APRIL 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN



> SERIE: 100 Jahre Relativitätstheorie



> Die Neptun-Affäre

> ESSAY: Religion der Olmeken

> Überstimmte Gene

www.spektrum.de

ARCHÄOLOGIE

Die Entstehung unserer Schrift

Wie sich aus semitischen Ursprüngen das lateinische Alphabet entwickelte

TSUNAMIS

Gefahr im Mittelmeer?

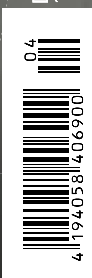
INFLUENZA

Droht eine globale Epidemie?

FREIER WILLE

Wie frei ist unser Nichtwollen?

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €





Reinhard Breuer
Chefredakteur

Lieber nicht mehr im Mittelmeer baden?

Nicht nur die Küsten Japans, Sumatras oder Sri Lankas sind von Seebeben bedroht, sondern auch die Anrainer des Mittelmeers. Eigentlich ist das nichts Neues, denn die Ursache der Beben, die unaufhaltsame Verschiebung der afrikanischen und der anatolischen Erdplatte gegen die eurasische Platte, ist hinlänglich bekannt. Natürlich schauen nach der Tsunamikatastrophe vom 26. Dezember letzten Jahres in Südostasien die Seismologen kritischer auch auf diese bekannten »Störungszonen« rund um Europa.

Der Blick aufs Mittelmeer in unserem Tsunami-Artikel (ab S. 34) wirkt nicht gerade beruhigend. Der französische Seismologe Pascal Bernard markiert darin die wichtigsten Seebeben in der Region, wie sie seit der Antike die Küsten verwüsteten. Zuletzt fegten am 9. Juli 1956 in der Ägäis bis zu 20 Meter hohe Wellen über Inseln zwischen Naxos und Rhodos.

Diese extremen Wellen schreiben die Forscher nicht allein dem Erdbeben der moderaten Stärke 7,5 zu, sondern auch einem »Verstärker« – einem unterseeischen Hang, der infolge der Erschütterung abrutschte. Das ist wohl die eigentliche Gefahr, die im Mittelmeer lauert: mittelschwere Beben, die instabile Küstenabhänge in die Meerestiefen stürzen lassen. Warnsysteme wie im Pazifik würden bei den relativ kleinen Dimensionen unseres liebsten Urlaubsgewässers nur wenig nützen. Der Bebenforscher Pascal Bernard weiß gegen diese Gefahr daher auch keinen anderen Rat als: »Entfernen Sie sich vom Ufer und begeben Sie sich auf eine Anhöhe.«

Vor allem junge Menschen fielen in den Jahren 1918 und 1919 der Spanischen Grippe zum Opfer. Weltweit könnte es, nach neueren Schätzungen, damals 50 Millionen Tote gegeben haben. Andere Influenza-Pandemien, wenn auch mit jeweils einer Million Toten weniger dramatisch, liefen 1957 und 1968 um die Welt. Jetzt schildern drei amerikanische Molekularbiologen, wie sie – nach jahrelanger Jagd – den besonders aggressiven Virusprototyp »H1N1« aus Gewebeproben damaliger Opfer rekonstruieren konnten (S. 52).

H1N1 dient heute als Vorbild und Warnung: Jederzeit könnte ein neues Supervirus den Erdball mit einer Grippekatastrophe überziehen. Bis jetzt haben wir, trotz Vogelgrippe oder Sars, einfach Glück gehabt. Die Gefahr ist besonders groß, wenn Menschen mit Vögeln und Schweinen zusammenleben. Kein Wunder also, dass vor allem das aktuell grassierende Vogelgrippe-Virus »H5N1« als potenzieller Unheilsbote der nächsten Pandemie gilt. Seit 1997, als die Vogelgrippe in China erstmals ausbrach, haben Forscher leider noch immer kein klares Schutzkonzept gegen den Erreger vorgelegt. Zwar hat H5N1 bisher offenbar Probleme, von Mensch zu Mensch zu gelangen. Aber wo diese sich an Tieren infizieren, sterben drei Viertel der Betroffenen.

Kürzlich meldeten chinesische Forscher, sie hätten einen neuen Impfstoff entwickelt, der Hühner mindestens zehn Monate vor H5N1 schütze – und damit vier Monate länger als die Vorgängermedikamente. Für Menschen befinden sich potenzielle Vakzine erst in Erprobungsphase I. Ungelöst wäre dann noch die Frage einer weltweiten Produktion des Impfstoffs, der am Beginn einer Pandemie global bereitstehen müsste. Denn das sind alles keine Planspiele: Eine neue weltweite Grippeseuche halten die Forscher für längst überfällig.

INHALT

Titelbild: Die 1908 bei Ausgrabungen in Gezer (Israel) gefundene Kalksteintafel ist etwa 3000 Jahre alt. Sie markiert die Trennung der Entwicklungslinien von hebräisch-arabischer und phönizisch-griechisch-lateinischer Schrift
Istanbul Archaeological Museum

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



SEITE 28

ORNITHOLOGIE

Mauersegler – Leben in der Luft

Dieser Vogel verlässt sein eigentliches Element nur noch zu Brutzwecken. Schon der allererste Flug des Jungvogels dauert Monate

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SEISMOLOGIE SEITE 34

Tsunamis

Die Mechanismen, welche die Flutwelle im Indischen Ozean auslösten, sind dieselben, die auch das Erdbeben von Lissabon 1755 und andere historische Katastrophen verursachten. Sie können jederzeit und an vielen Orten wieder wirksam werden



SEITE 52

EPIDEMIOLOGIE

Spanische Grippe – Nachbau des Killervirus

Mehr Tote forderte keine Influenza als die Pandemie am Ende des Ersten Weltkriegs. Jetzt kennen Forscher die Gene jenes Virus. Damit zeigen sie auch mögliche Ursprünge einer neuen schweren Grippeepidemie auf

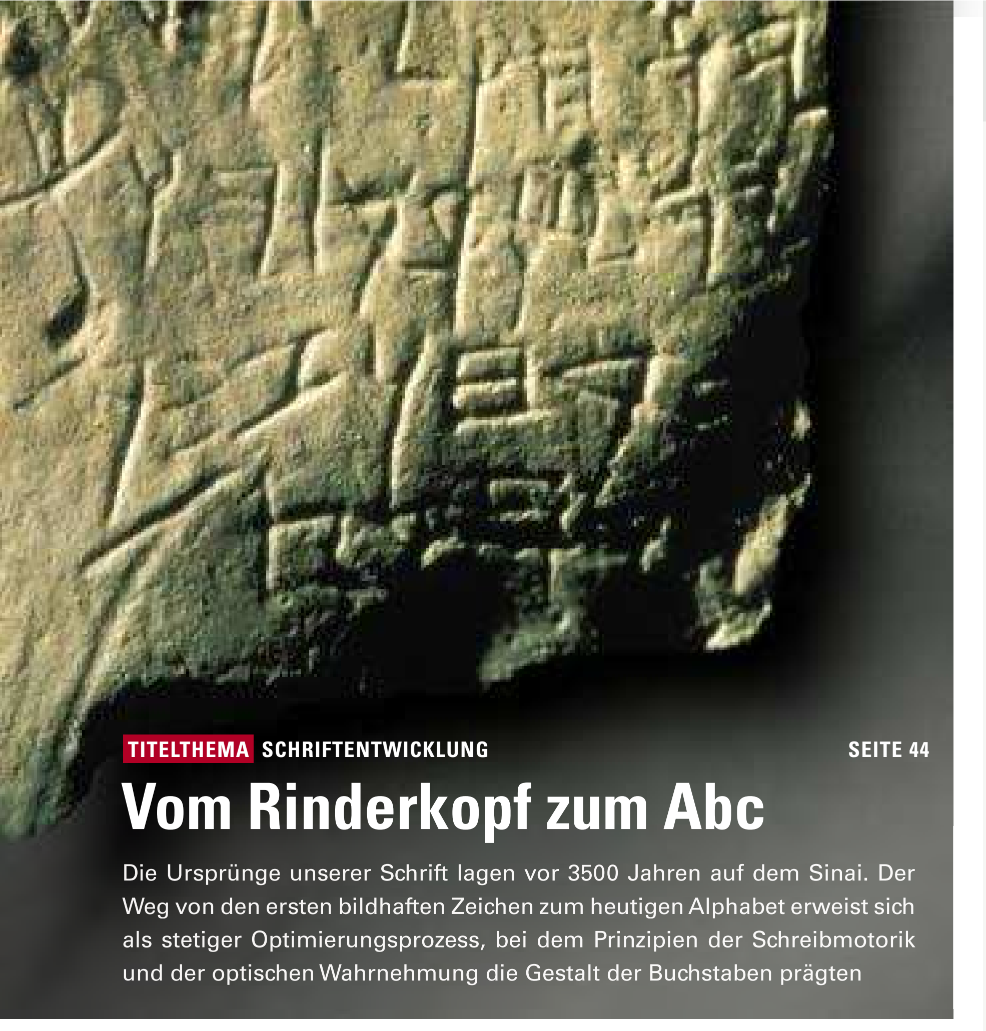


SEITE 70

GENETIK

Komplexes Erbe

Veranlagungen sind das eine, ob sie zum Tragen kommen, etwas anderes. Warum beeinträchtigt etwa eine Mutation manche Individuen stark, andere aber gar nicht?



TITELTHEMA SCHRIFTENTWICKLUNG SEITE 44

Vom Rinderkopf zum Abc

Die Ursprünge unserer Schrift lagen vor 3500 Jahren auf dem Sinai. Der Weg von den ersten bildhaften Zeichen zum heutigen Alphabet erweist sich als stetiger Optimierungsprozess, bei dem Prinzipien der Schreibmotorik und der optischen Wahrnehmung die Gestalt der Buchstaben prägten

SEITE 66

GESPRÄCHE UM EINSTEIN (II)

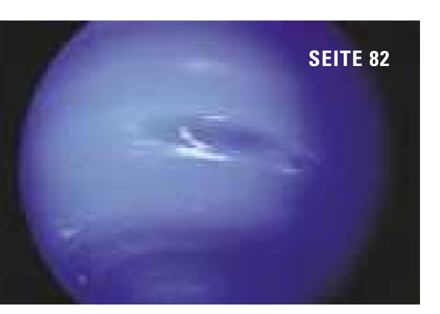
Kosmologie und Gravitationswellen

Was war so bahnbrechend an Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie? Der Gravitationsforscher Bernard Schutz schildert, mit welchen Herausforderungen die Forscher heute ringen

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE SEITE 82

Gestohlene Neptun-Papiere

Nachdem bestimmte Dokumente wieder auftauchten, konnten Historiker die Ereignisse um die Entdeckung des Planeten neu bewerten. Die bisherige Version ist falsch



SEITE 90

PSYCHOLOGIE

Freier Wille

Noch bevor wir uns zu einer Handlung entschließen, ist das Gehirn bereits aktiv. Warum glauben wir trotzdem so hartnäckig, uns selbstbestimmt entschieden zu haben?



APRIL 2005

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

JUNGE WISSENSCHAFT

KOMMENTARE

WISSENSCHAFT IM …

WEITERE RUBRIKEN

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Galaktische Spurensuche

Was verraten fantastische Bilder wie dieses über die Vergangenheit der Milchstraße? Leider nicht viel. Erst die Spektroskopie möglichst vieler einzelner Sterne gibt mehr Aufschluss

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Nachruf auf Dennis Flanagan

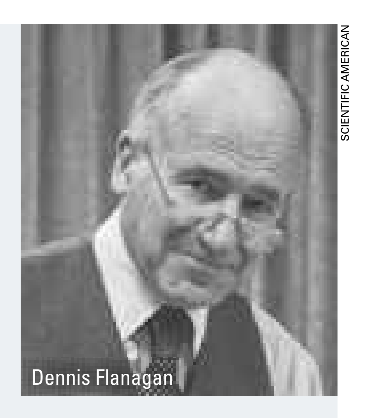
Der langjährige Chefredakteur von Scientific American starb im Januar.

Am 14. Januar erlag Dennis Flanagan im Alter von 85 Jahren einem Krebsleiden. Damit starb innerhalb weniger Monate der zweite Gründervater jenes Scientific American, den unsere Leser und wir kennen. Zusammen mit Gerard Piel und einer kleinen Investorengruppe hatte er 1947 das mehr als hundert Jahre alte Traditionsblatt erworben und von einem kränkelnden Gemischtwarenladen für Erfindungen, technische Kuriositäten und mechanische Spielereien zur führenden Stimme der Wissenschaft in der Öffentlichkeit gemacht. Wie sein Partner ging er 1984 in den Ruhestand – nach mehr als drei Jahrzehnten als Chefredakteur.

Flanagan hatte weder eine journalistische noch eine wissenschaftliche Ausbildung und begann seine berufliche Karriere nach einem abgebrochenen Studium als Sportreporter bei »Life«, wo er Piel kennen lernte. Erst der Auftrag, einen Artikel über den Atombombenabwurf auf Hiroshima zu schreiben, weckte sein Interesse an den Naturwissenschaften, das sich schnell zu Begeisterung auswuchs. Er verstand es, diesen Enthusiasmus glaubwürdig in die neu konzipierte Zeitschrift einzubringen.

Flanagan, der seit einer Erkrankung in der Kindheit ertaubt war, lenkte die Geschicke des Magazins diskret aus dem Hintergrund. In den 37 Jahrgängen, für die er verantwortlich zeichnete, taucht sein Name nicht ein einziges Mal neben einem Artikel auf. Dafür gelang es ihm, große Namen der Wissenschaft wie Hans Bethe, James D. Watson, Francis H. C. Crick, J. Robert Oppenheimer, Linus Pauling und Albert Einstein als Autoren zu gewinnen. Durch heroisches Redigieren verwandelten er und sein Redaktionsteam den Fachjargon in verständliche Laiensprache.

Die American Society of Magazine Editors ehrte Flanagan 1999 mit einem Platz



Dennis Flanagan

in ihrer Ruhmeshalle. Er selbst sah seine Verdienste mit einem guten Schuss Ironie. Als Spruch für seinen Grabstein wünschte er sich denn auch die Bemerkung, mit der ihn eine Filmkritikerin, die sich viel auf ihre wissenschaftliche Unbildung zugute hielt, einmal bei einer Party bedachte: noch so ein Renaissance-Heini.

Die Redaktion

Klare Sicht durch Augenlinsen

Februar 2005

Korrekter Einsatz der Sonnenbrille

Es ist in der organischen Chemie kein einziges organisch-chemisches Material (außer einigen hochfluorierten Polymeren wie Teflon) bekannt, welches die Kombination UV-Licht, Sauerstoff und Wasser über längere Zeit unbeschadet übersteht. Mehr noch gilt das für durchsichtige, mit sauerstoffhaltigem Wasser getränkte Stoffe. Hydroxyl- und andere Radikale, die darin durch UV-Strahlung entstehen, greifen organische Substanzen schnell an. Keine solche Substanz könnte der UV-Strahlung der Sonne ohne Eintrübung mehrere Monate standhalten.

Dass die Augenlinse des Menschen diese Belastung dennoch viele Jahrzehnte verträgt, bevor sich grauer Star äußert, zeigt daher, dass die Zellen der Linse über noch nicht entdeckte effektive Reparaturmechanismen verfügen müssen.

Bislang unberücksichtigt blieb von der Medizin, dass der Anteil an UV-Strahlung mit dem Sonnenstand extrem schwankt! So kann der UV-Anteil der Sonnenstrahlung (besonders der kurzwelligste) mittags um den Faktor 10 oder mehr höher sein als bereits einige Stunden später. Die Intensität der UV-Strahlung nimmt nicht linear mit der Dicke der durchlaufenen Luftschicht ab, sondern exponentiell. Der Anteil der UV-Strahlung ist daher auf Bergen und am Äquator noch höher.

Menschen in sehr hoch gelegenen oder südlichen Gegenden müssten demnach eigentlich bereits als Kleinkinder, ja als Säuglinge (!), völlig erblindet sein!

Da dies nicht der Fall ist, muss das Auge offensichtlich über Anpassungsmechanismen verfügen. In Gegenden mit hoher UV-Strahlung »lernt« es, die Strahlungsschäden schneller zu beheben. Aber auch Menschen aus dem Norden passen sich einer UV-strahlungsreichen Umgebung nach einiger Zeit an. Dies alles wirft ein sehr bedenkliches Licht auf die Warnung vieler Augenärzte, bei Sonnenschein Sonnenbrillen, vor allem solche mit UV-Schutz, zu tragen. Denn durch die Sonnenbrille wird das notwendige UV-Training der Augen unterbunden. Wird eine solche UV-Schutz-Brille dann doch einmal bei Sonnenschein nicht aufgesetzt, so trifft die UV-Strahlung das untrainierte Auge völlig unvorbereitet und richtet große Schäden an.

Der korrekte Einsatz einer Sonnenbrille wäre demnach, sie eben in all den Fällen nicht zu tragen, wenn die Sonne relativ flach am Himmel steht. Denn dies ist für das Auge das notwendige Training, um auch stärkere Strahlung wegstecken zu können. Sinnvoll ist das Tragen von Sonnenbrillen daher nur in den Mittagsstunden, auf Bergen und im Urlaub im Süden, also bei Extrembelastung.

Ansonsten leistet man genau dem Vorschub, was man eigentlich zu verhindern trachtete: der Bildung des grauen Stars im Alter!

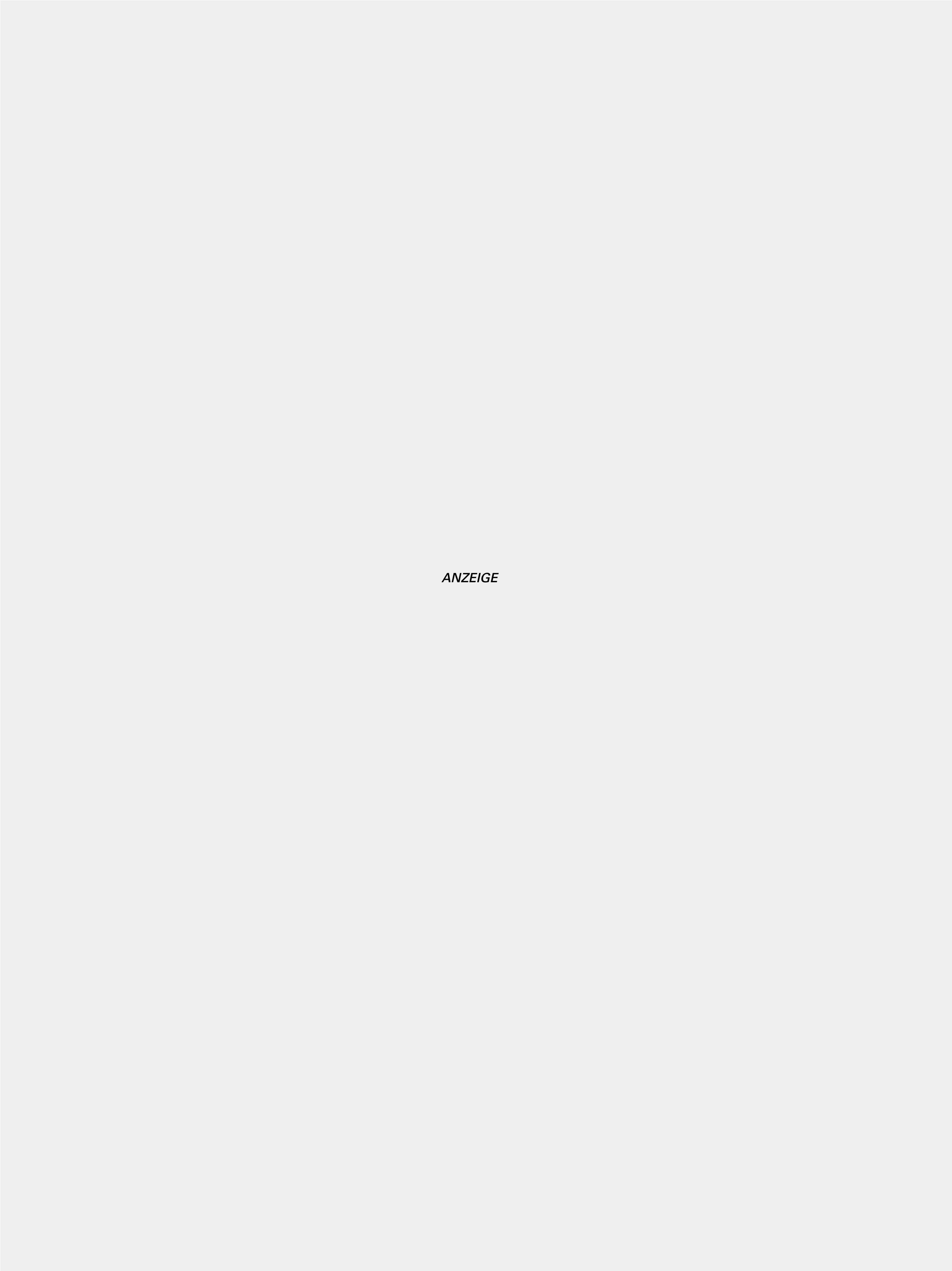
Dr. Stefan Brosig, Stuttgart

Antwort des Autors:

Die Augenlinse ist wie andere Gewebe verschiedenen Quellen oxidativen Stresses ausgesetzt. Dazu zählt auch die vom Leser beschriebene UV-Strahlung, die zur Entstehung sehr reaktiver Radikale führen kann. Letztere schädigen unter anderem die Proteine der Linsenzellen und können so zu deren Aggregation und letztlich zur Linsentrübung führen. ▷

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:
Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 104840
D-69038 Heidelberg
E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729


ANZEIGE



CLAUS SCHÄFER / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

◁ Sonnenbrillen sollte man in erster Linie draußen bei hohem Sonnenstand tragen.

▷ Im Gegensatz zur überwiegenden Mehrzahl der Zelltypen enthalten reife Linsenzellen keine zytoplasmatischen Organellen mehr, auch keinen Zellkern. Sie sind somit nicht fähig, Zellen oder beschädigte Proteine durch neue zu ersetzen.

Die Linse muss sich deshalb besonders effektiv vor oxidativen (und anderen) Schäden schützen. Zu diesem Zweck verfügt sie über verschiedene Mechanismen, die bisher allerdings nur unvollständig verstanden sind. Zum einen enthält sie Enzyme, die oxidativen Schäden vorbeugen können, etwa Superoxid-Dismutasen, die Superoxid-Radikale zu Wasserstoffperoxid umwandeln (und somit Kettenreaktionen freier Radikale verhindern), und Enzyme, die das reaktive H_2O_2 zu unschädlichem Wasser reduzieren.

Zum anderen enthalten Linsenzellen kleine Moleküle, die Kettenreaktionen freier Radikale stoppen können, wenn sie doch einmal in Gang gekommen sind. Diese kleinen Moleküle können entweder über das Kammerwasser des Auges in die Linse diffundieren, zum Beispiel die Antioxidantien Ascorbinsäure (Vitamin C) und Vitamin E; oder sie werden in der Linse selbst synthetisiert und regeneriert.

Außerdem verfügt die Linse auch über Mechanismen, die entstandene Schäden wieder beheben können. Methionin-Sulfoxid-Reduktasen reparieren oxidative Schäden an Proteinen. Einige der Kristallin-Proteine, die in Linsen in großen Mengen vorkommen, haben eine proteinstabilisierende Funktion: Sie schützen Proteine vor Fehlfaltungen und verhindern ihre Aggregation (eine wichtige Ursache für Katarakte).

Es sollte auch bedacht werden, dass infolge fehlender Mitochondrien der oxidative Metabolismus verglichen mit anderen Zellen sehr stark eingeschränkt ist – somit entfällt in diesen Zellen auch eine wichtige Quelle freier Radikale.

Trotz dieser Schutzmechanismen führt die jahrelange Belastung der Linse dazu, dass sich immer mehr kleine irreparable Schäden anhäufen, was schließlich zu einer gelbbräunlichen Verfärbung der Linse und zur Bildung einer Katarakt führen kann.

Falsches Geschlecht

Der Katarakt ist die Stromschnelle; die Trübung der Augenlinse ist die Katarakt.

Dr. Gabriele Herbst, Mannheim

Leben Viren?

Februar 2005

Dem Autor L. P. Villareal fällt die Beantwortung auch deshalb so schwer, weil sie mit der präzisen »wissenschaftlichen Definition des Begriffs Leben an sich« zusammenhängt. Wo sich die Biologie schwer tut, ist die Biosemiotik einen Schritt weiter.

Wo immer im inner- oder zwischenzellulären Bereich Zeichen (zum Beispiel Botenmoleküle) beziehungsweise Kodes (DNA, RNAs) verwendet werden, handelt es sich eindeutig um Leben: Die Zeichenverwendung folgt grammatischen, semantischen und pragmatischen Regeln, die »molekulare Grammatik« hat ja bereits Manfred Eigen eindrücklich dargestellt. Während biologische Individuen aber ein Verhältnis der Befolgung oder Nichtbefolgung zu diesen Regeln haben können, fehlt dieses Verhältnis gegenüber Naturgesetzen.

Zu Naturgesetzen hat ein Bioindividuum kein Verhältnis, sondern es unterliegt ihnen in jedem Fall und in striktem Sinne. In immer mehr biologischen Disziplinen wird bei zeichenvermittelten Interaktionen als Voraussetzung für koordiniertes Verhalten von Kommunikation gesprochen. Im Wurzelbereich von Pflanzen finden wir zum Beispiel parallele zeichenvermittelte Interaktionen über Art- und Organismenreich-Grenzen hinweg. Werden bei biogenen Kommunikationsprozessen die grammatischen, semantischen und pragmatischen Regeln befolgt, gelingen diese Kommunikationsprozesse; werden die Regeln nicht befolgt, misslingen sie. Kristalle oder Photonen hingegen können nicht kommunizieren, sie unterliegen ausschließlich Naturgesetzen.

Dr. Günther Witzany, Bürmoos, Österreich

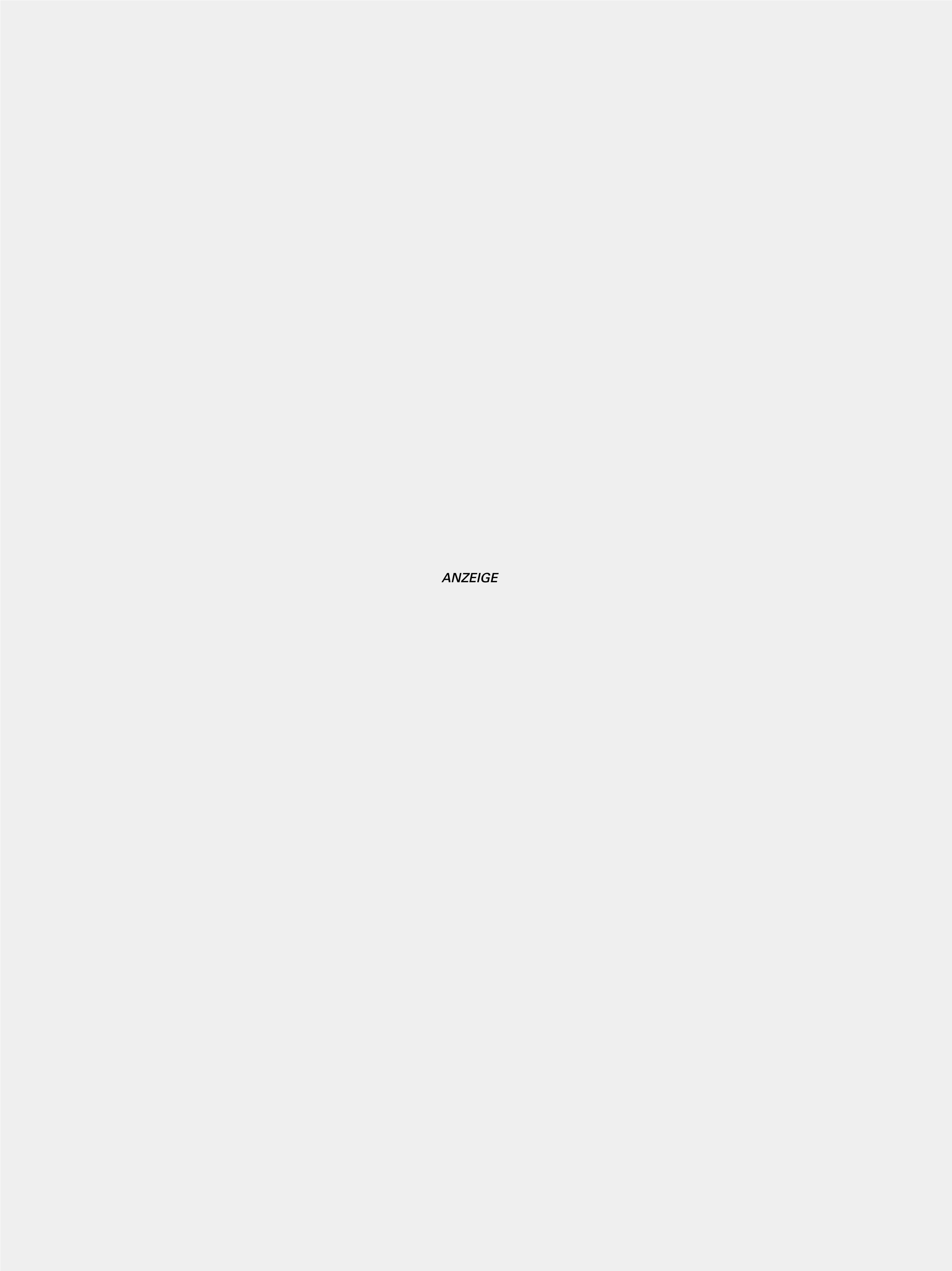
Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751; Amtsgericht Heidelberg, HRB 2766
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Gabriele Herbst, Dr. Susanne Lipps-Breda, Michael Vogel

Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Julius-Hölder-Str. 47, D-70597 Stuttgart-Degerloch, Vertretungsberechtigter Uwe Bronn
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22 706 708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.
Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson


ANZEIGE

Mars überraschend jung und dynamisch

Forschung aktuell, Februar 2005

Bereits die relative Datierung der Caldera I (C.I) muss falsch sein. In ein Brett, das nicht vorhanden ist, kann man schließlich kein Loch stanzen oder bohren. C.I muss die älteste Form sein, denn sie wird von allen anderen durchbrochen. C.II ist auf alle Fälle jünger als C.I. C.III bis C.V sitzen, wie C.II, am Rand der ältesten Form C.I, wie bei Sekundär-Vulkanen im Bereich von Randspalten großer Krater oft üblich. Auch deren Datierung untereinander muss falsch sein, denn C.III ist älter als C.IV und C.IV älter als C.V, wie aus den Formen klar hervorgeht.

Es gibt auch Fotos von 1977 mit einer Auflösung bis 18 Meter. Dort ist eindeutig zu erkennen, dass der Kraterboden von C.I von Material (Lockermassen?) aus C.IV überdeckt wurde und dass von C.V Material über C.IV ausgeströmt ist. Der Boden von C.V ist als Einziger recht glatt, von randlichen Rutschmassen unterhalb der sehr unterschiedlich hohen Kraterwände einmal abgesehen.

Übrigens besteht C.IV aus zwei Teilen, die Grenze zwischen beiden wurde durch Material aus C.V überdeckt und C.V sitzt auf dem Rand eines der beiden Teile.

Im Übrigen wurden viele kleine Krater auf dem Mars mit Staubsturm-Sedimenten aufgefüllt, je älter die Krater, desto stärker. Die bei Mond und Merkur bewährte Methode ist also für den Mars nicht geeignet.

Bei der Hecates-Tholus-Caldera müsste die Reihenfolge heißen: I, III und V. IV und II als jüngste Form. Die auf der Abbildung S. 13 gezeigten Formen im Vorfeld der Steilstufe ähneln tatsächlich dicht liegenden »Jahresmoränen« alpiner Gletscher, es könnte sich aber auch um Ablagerungen mehrfach abgegangener, wasserreicher Schlammströme *(mud flows)* handeln, entstanden durch Auftauen von stark mit Staub beladenem Eis in Permafrost-Bereichen am Steilhang.

Dr. habil. A. Zienert, Heidelberg

Antwort von Professor Gerhard Neukum:
Im »Nature«-Artikel, der dem Spektrumbeitrag zu Grunde liegt, steht explizit, dass die Altersabfolge der Teilcalderen, die rein aus den statistischen Werten der superponierten Kraterhäufigkeit ableitbar ist, nicht ganz den aus den geologischen Prozessen zu erwartenden Altersabfolgen entspricht. Das ist auch nicht wirklich erstaunlich. Denn zum einen sind die Altersunterschiede relativ gering und liegen praktisch innerhalb des statistischen Fehlers von etwa dreißig Prozent; zum anderen können nachfolgende erosive Prozesse – zum Beispiel die in den Bildern sichtbaren tektonischen Prozesse – zu kleineren Altersverschiebungen geführt haben. Innerhalb der Fehlergrenzen sind alle Teilcalderen 150 ± 50 Millionen Jahre alt.

Die Methode führt, wie mehrfach gezeigt und publiziert, auch auf dem Mars zu hervorragenden Ergebnissen, besonders bei Bildern hoher Auflösung und mit möglichst geologisch flächenhaft weiträumigem Kontext. Die MEX HRSC-Bilder sind exzellent geeignet, weil sie große Flächen mit hoher Auflösung abdecken; zusätzlich helfen höchstauflösende MOC-Daten von Global Surveyor, die »Lupen«-Charakter innerhalb der HRSC-Flächen haben. Mit diesen Bilddaten ist es möglich, die Flächen genau fotogeologisch zu untersuchen, zu kartieren, die Prozesse, die auf den kartierbaren Einheiten abgelaufen sind, zu verstehen, Sekundärkrater und vulkanische Krater weit gehend bezüglich der Zählungen zu eliminieren und Erosionsprozesse, wie sie Dr. Zienert angesprochen hat, richtig einzuschätzen und bei der Auswertung zu berücksichtigen.

Die Autoren des »Nature«-Beitrags führen ihre Arbeit auf der Basis jahrzehntelanger Erfahrungen in planetarer und terrestrischer Geologie aus (insbesondere mit profundem Hintergrund über die geologische Entwicklung des Planeten Mars und allgemein über Vulkanismus, glaziale Prozesse und die angewendete Datierungsmethode). Für ein tiefer gehendes Verständnis der Methode sei die Lektüre der im »Nature«-Artikel zitierten Literatur empfohlen.


ESA/ DLR / FU BERLIN (G. NEUKUM)

◄ Das Alter der Hecates-Tholus-Caldera wurde mittels Funkdaten der High Resolution Stereo Camera (HRSC) bestimmt.

Asselspinne scheibchenweise

Spektrogramm, Januar 2005

In dem Beitrag zu der fossilen Asselspinne *Haliestes dasos* wurde leider eine Tatsache und dadurch auch das Ergebnis bezüglich der systematischen Stellung der Asselspinnen falsch wiedergegeben. Die heute lebenden Asselspinnen haben Cheliceren (Scheren), auch die abgebildete Art. In jedem zoologischen Lehrbuch kann man nachlesen, dass die Asselspinnen systematisch zu den Spinnentieren gehören.

Die Forscher stellten durch Untersuchungen an dem Fossil fest, dass es keine Belege liefert, die der bisherigen Hypothese widersprechen.

Dr. Gert Tröster, Göttingen

Carving-Ski

Wissenschaft im Alltag, Februar 2005

Ein Drehmoment wird durch zwei entgegengesetzt gleiche Kräfte gebildet, deren Wirkungslinien sich nicht schneiden, salopp ausgedrückt, »Drehmoment = Kraft mal Kraftarm«. Bei einer Kurvenfahrt mit dem Carving-Ski besteht das Kräftepaar aus der in Skimitte angreifenden Gewichts- und Trägheitskraft des Skifahrers einerseits und aus dem an der Kante angreifenden Gegendruck der Schneeoberfläche andererseits.

Falls dieses Drehmoment nicht durch entgegengesetzte Drehmomente ausgeglichen wird, beginnt sich der Ski um die Längsachse zu drehen. Erst diese durch zeitliche Integration des Drehmoments entstehende Drehbewegung (nicht Verwindung!) entspricht der physikalischen Größe des Drehimpulses. Im Falle der Carver wird jedoch das Drehmoment durch ein durch die Torsionssteifigkeit der Ski – gegebenenfalls unterstützt durch Piezofasern – vermitteltes Gegenmoment ausgeglichen, sodass es zwar zu Verwindungen, jedoch nicht zu nennenswerten Drehungen um die Längsachse kommen kann. Damit ist klar, dass es im vorgenannten Beitrag um Drehmomente und nicht um Drehimpulse geht.

Dr. Martin Treiber, Dresden

SPEKTROGRAMM

BIOLOGIE

Meister des Fastfood

■ Wie sein kleinerer Vetter, der Maulwurf, wühlt sich der Sternmull durch das kalte, dunkle Erdreich auf der Suche nach Nahrung. Was ihm dabei an Insektenlarven oder Würmern in den Weg kommt, hat keine Chance zu entrinnen; denn der in Nordamerika beheimatete *Condylura cristata* frisst seine Beute so schnell, dass das menschliche Auge nicht mehr folgen kann. Wie Wissenschaftler um Kenneth Catania und Fiona Remple von der Vanderbilt-Universität in Nashville (Tennessee) mit einer Hochgeschwindigkeitskamera herausgefunden haben, benötigt er nur etwa 230 Millisekunden, um eine Larve zu ertasten, zu packen und zu verschlingen. Zum Vergleich: Wer eine rote Ampel erblickt und sofort auf die Bremse tritt, braucht mehr als doppelt so lange. Das annähernd blinde Tier spürt seine Mahlzeiten mit einem sternförmigen Tastorgan auf, das über 100 000 Nervenfasern enthält – fast sechsmal so viel wie die menschliche Hand. Nach maximal 130 Millisekunden hat es damit die Beute geortet und greift mit seinen pinzettenartigen Zähnen danach. Die Forscher vermuten, dass sich der Räuber mit diesem Fresstempo eine spezielle Nahrungsquelle erschlossen hat: besonders kleines Getier, von dem er entsprechend viel vertilgen muss, um satt zu werden. *(Nature, 3.2.2005, S. 519)*

▶ Mit seiner lappigen Nase ertastet der Sternmull Beute in Rekordzeit.

ASTROPHYSIK

Schwarze Löcher waren ihr Schicksal

■ Ein internationales Forscherteam hat mit einem neuen Computermodell die Entwicklung von Galaxien simuliert. Dabei konnte es klären, wieso sich in der Frühzeit des Alls vorübergehend extrem leuchtstarke Quasare bildeten und warum alle heutigen Sternsysteme ein superschweres Schwarzes Loch enthalten.

Das prägende Ereignis im Leben einer jungen Galaxie war demnach ihre Kollision und Verschmelzung mit einem oder mehreren Schicksalsgenossen. Auch die frühen Sternsysteme enthielten bereits kleine Schwarze Löcher, die sich beim Zusammenstoß vereinigten. Zugleich trieben Gezeitenkräfte diffuses Gas ins Zentrum. Dort löste es eine explosionsartige Sternbildungsphase aus und fütterte außerdem das vereinigte Schwarze Loch. Beide Prozesse setzten gigantische Energiemengen frei: Ein Quasar war entstanden.

Je schwerer das Schwarze Loch wurde, desto mehr Material verschlang es und desto heller strahlte das Galaxienzentrum. Dabei heizte es das umgebende Gas jedoch immer mehr auf und trieb es schließlich in die Randgebiete. Damit fehlte dem gerade noch üppig gemästeten Schwarzen Loch plötzlich die Nahrung, und auch die Sternentstehung kam mangels Rohmaterial zum Stillstand. Der Quasar erlosch und wurde zu einer relativ lichtschwachen Galaxie, wie sie heute das Weltall bevölkern – mit einem auf Diät gesetzten Massemonster im Zentrum. *(Nature, Bd. 433, 10.2.2005, S. 604)*



MPI FÜR ASTROPHYSIK

◀ Kollision im Computer: Im zweiten Anlauf verschmelzen zwei Galaxien zu einem Quasar mit zentralem Schwarzem Loch, das durch seine extreme Aktivität schließlich das für sein weiteres Wachstum benötigte Gas davonbläst.

PALÄANTHROPOLOGIE

Uralt und doch modern

■ Gen-Analysen legten schon länger nahe, dass der *Homo sapiens* vor rund 200 000 Jahren in Afrika auftauchte. Doch Fossilfunde fehlten bisher – zumindest glaubte man das. Dabei waren schon 1967 bei Kibish in Äthiopien Überreste des modernen Menschen entdeckt worden – Omo I und Omo II –,



JOHN G. FLEAGLE

◀ Die beiden Reste eines Schenkelknochens gehören zu einem *Homo sapiens*, der nun auf 195 000 Jahre datiert wurde.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

die sich nun als 195 000 Jahre alt erwiesen. Seinerzeit hatte man »nur« ein Alter von 130 000 Jahren für sie ermittelt. Die neue Datierung mit verbesserten Methoden unternahm ein Forscherteam um Ian McDougall von der australischen Universität in Canberra. Die Hauptschwierigkeit bestand darin, den exakten Fundort wieder aufzuspüren. Doch dies gelang, und die Forscher konnten sogar einige weitere Skelettteile der beiden Frühmenschen bergen.

McDougall und seine Mitarbeiter datierten zunächst die vulkanische Gesteinsschicht, auf der die Knochen lagen, sowie eine zweite fünf Meter darüber mit der Kalium-Argon-Methode. Das Ergebnis: 196 000 beziehungsweise 104 000 Jahre. Zwischen den beiden Schichten befinden sich Faulschlammablagerungen, die der Fluss Omo bei mehreren Überschwemmungen hinterlassen hat. Durch deren Analyse und Vergleich mit analogen, gut datierten Ablagerungen des Nils im Mittelmeer ließ sich das Alter der Fundstätte weiter eingrenzen. Der so ermittelte Wert von 195 000 Jahren bestätigt die Theorie, dass der moderne Mensch aus Afrika kam.

(Nature, Bd. 433, 17.2.2005, S.733)

PLANETENFORSCHUNG

Treibeis auf dem Mars

Wären die Farben weiß-blau statt gelb-braun, sähe das Bild aus wie ein Satellitenfoto von Treibeis an den Polen. Aufgenommen hat es die hochauflösende Stereokamera an Bord des Esa-Satelliten Mars Express in der Ebene Elysium Planitium in der Äquatorialregion des Roten Planeten. Wassereis würde dort wegen des geringen Atmosphärendrucks in kürzester Zeit verdunsten (sublimieren). Aber wenn es von Staub bedeckt ist, kann es sich vermutlich halten. Nach der geringen Anzahl der Krater zu schließen, ist die abgebildete Oberfläche höchstens 5 Millionen Jahre alt.

Die Esa-Forscher vermuten daher, dass vor relativ kurzer Zeit – wahrscheinlich infolge eines Vulkanausbruchs – große Mengen Wasser durch Spaltensysteme, die als Cerberus Fossae bekannt sind, aus dem Marsboden austraten und ein 700 000 Quadratkilometer großes Gebiet etwa 45 Meter hoch überfluteten. Beim raschen Gefrieren während des Fließens bildeten sich große Treibeisschollen, die binnen Kurzem von Vulkanasche und Staub bedeckt wurden. Das nicht gefrorene Wasser dazwischen verdampfte, sodass die Blöcke übrig blieben.

Wenn diese Interpretation stimmt, bestätigt sie andere Befunde aus jüngster Zeit. Danach war der Mars noch bis vor Kurzem vulkanisch aktiv und enthält viel mehr Wasser als bisher gedacht.

(Esa-Presseinformation, 23.2.2005)

▼ **Die unregelmäßigen Blöcke auf diesem Foto der Marsebene Elysium Planitium halten Forscher für staubbedeckte Eisschollen.**



ESA / DLR / FU BERLIN (G. NEUKUM)

ARCHÄOLOGIE

Steinzeitliche Diamantschleifer



◄ Der Diamantschliff machte diese Korund-Axt zur wertvollen Grabbeigabe vor 6000 Jahren.

■ Korund ist das zweithärteste Mineral. Wirklich gut polieren lässt er sich deshalb nur mit dem noch härteren Diamant. Offenbar wussten das bereits chinesische Handwerker vor 6000 Jahren. Peter J. Lu von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) und seine Kollegen untersuchten jetzt vier spiegelglatt polierte Korund-Äxte aus den Gräbern reicher Bürger der Sanxingcun- und Liangzhu-Kultur. Nach diversen Analysen des Steins, der rasterelektronenmikroskopischen Inspektion seiner Oberfläche und Schleiftests mit modernen Geräten steht fest: Die 13 bis 22 Zentimeter großen Äxte können nur mit Diamanten so perfekt bearbeitet worden sein.

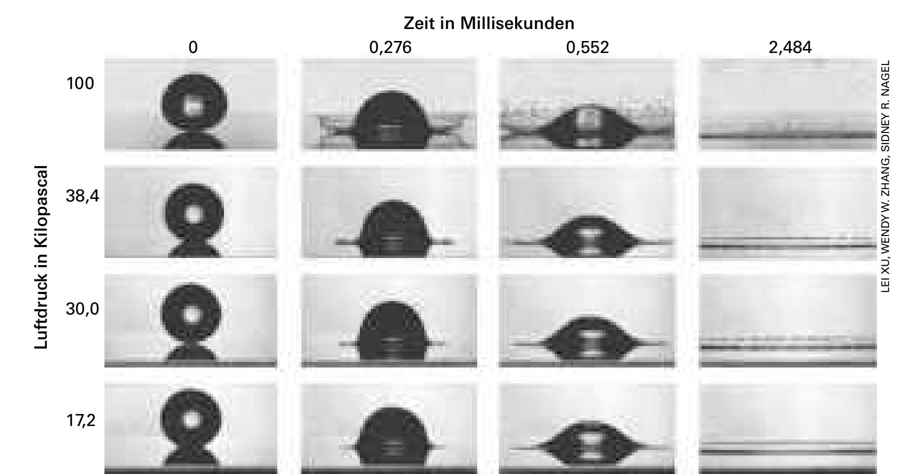
Tatsächlich gibt es rund 240 Kilometer entfernt von den Fundorten Vorkommen des Edelsteins. Vermutlich zerstießen die jungsteinzeitlichen Polierer das diamanthaltige Gestein, befeuchteten die Trümmer und ließen sie über eine gefettete Tierhaut rollen. Während die leichten Edelsteinsplitter daran hängen blieben, fiel der schwerere Rest zu Boden. *(Archaeometry, Bd. 47, Nr. 1, S. 1)*

HYDRODYNAMIK

Tropfen ohne Spritzer

■ Was geschieht, wenn ein Tropfen auf eine glatte Oberfläche trifft? Richtig, es spritzt. Aber diese Alltagserfahrung ist keineswegs ein Naturgesetz. Mit Aufnahmen von Hochgeschwindigkeitskameras hat jetzt ein Team um Sidney Nagel von der Universität Chicago untersucht, wie sich die lästigen Spritzer vermeiden lassen. Schon bisher wusste man, dass es von der Viskosität der Flüssigkeit und der Geschwindigkeit des Tropfens abhängt, ob und wie sehr dieser beim Aufprall zerstiebt. Nach den Untersuchungsergebnissen der US-Forscher spielen aber auch Druck und Zusammensetzung des umgebenden Gases eine wichtige Rolle. So vermindert die Absenkung des Luftdrucks die Bildung von Spritzern; schon bei 380 Hektopascal unterbleibt sie ganz. Dieser zunächst paradox anmutende Effekt hängt damit zusammen, dass der auftreffende Tropfen auseinander läuft. Wird er dabei von hohem Luftwiderstand gebremst, wölbt sich sein Rand nach oben und zerfällt in Spritzer. Bei niedrigem Druck oder einem Gas mit geringem Molekulargewicht wie Helium geschieht das dagegen nicht. Die neuen Erkenntnisse könnten helfen, Verbrennungsmotoren oder Tintenstrahldrucker zu verbessern. *(arXiv:physics/0501149)*

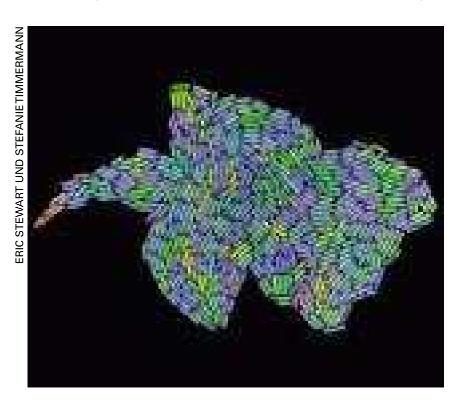
▼ Je geringer der Druck des umgebenden Gases, desto weniger spritzt der Tropfen beim Aufprall.



MIKROBIOLOGIE

Alternde Bakterien

■ Niemand ist unsterblich. Nur einzellige Mikroben galten bisher als Ausnahme, weil sie sich zur Vermehrung einfach teilen, sodass die Mutterzelle in den beiden Töchtern aufgeht und damit scheinbar unbegrenzt weiterlebt. Doch nun konnte ein Team um Eric Stewart vom Medizinforschungsinstitut Inserm in Paris auch bei einem Bakterium Alterserscheinungen nachweisen. Dazu beobachteten die Forscher mehr als 35 000 mit Fluoreszenzfarbstoff markierte Zellen aus 94 Kolonien von *Escherichia coli* über viele Generationen hinweg unter dem Zeitraffer-Mikroskop.



▲ Coli-Bakterien, die über viele Generationen hinweg jeweils das »alte Ende« ihrer Mutterzelle geerbt haben, sind weniger vital als solche, denen die neu synthetisierte Hälfte zugefallen ist. Das Alter steigt in dieser angefärbten Kolonie von Blau über Grün und Gelb nach Rot.

Wie sie dabei feststellten, teilen sich die stäbchenförmigen Bakterien nur scheinbar in zwei gleiche Hälften. In Wahrheit übernimmt eine Tochterzelle den Großteil der – eingefärbten – alten Ausstattung von der Mutter, während ihre Schwester überwiegend – farbloses – neu synthetisiertes Material abbekommt. Wie sich nun zeigte, wuchsen Bakterien, die über mehrere Generationen jeweils das »alte Ende« geerbt hatten, langsamer als solche, denen das neue zugefallen war. Außerdem teilten sie sich seltener und starben mit höherer Wahrscheinlichkeit. Demnach ist ewiges Leben wirklich niemandem beschieden, auch Bakterien nicht.
(PLoS Biology, 2/2005, S. 295)

Mitarbeit: Eva Hörschgen und Stephanie Hügler

Marsforscher mit acht Beinen

Skorpione bewegen sich auch auf unebenem Gelände äußerst flink und sicher. Wegen dieser Eigenschaft haben sie Frank Kirchner und die Arbeitsgruppe Robotik an der Universität Bremen als Vorbild für einen Roboter genommen, der einmal die Marsoberfläche erkunden soll. Das Spinnentier steuert seine Bewegungen nicht über ein leistungsfähiges Gehirn, sondern mittels einfacher Reflexe. Die Bremer Forscher imitierten diese Eigenheit, um ohne komplizierte Elektronik schnelle, gezielte Bewegungen zu erreichen. So könnte der achtbeinige Roboter den behäbigen Rovern wie Spirit und Opportunity, die nun schon seit über einem Jahr auf dem Roten Planeten gemächlich ihre Kreise ziehen, dereinst die Schau stehlen.

Zurzeit testet das Ames Research Center der Nasa in Moffett Field (Kalifornien) einen Prototyp von der Größe eines Hundes. Mit seiner Fähigkeit, über unwegsames Gelände zu staksen, steile Felsen zu erklimmen und sich auch in dünne Felsspalten zu schieben, wäre der künstliche Skorpion eine ideale Ergänzung zu den schwerfälligen, wagengroßen Rovern mit ihren Kettenrädern. Ausgerüstet ist er mit Sensoren, einer Kamera und einem Greifer für Gesteinsbrocken. Mit dem Tragen von schweren Lasten hat er allerdings Probleme. Deshalb soll er wie ein Bremer Stadtmusikant auf dem Rücken eines Rovers zum Einsatzort reiten und dann ausschwärmen, um die Umgebung zu erkunden.

NASA / AMES RESEARCH CENTER

PALÄONTOLOGIE

Appetit auf Dinos

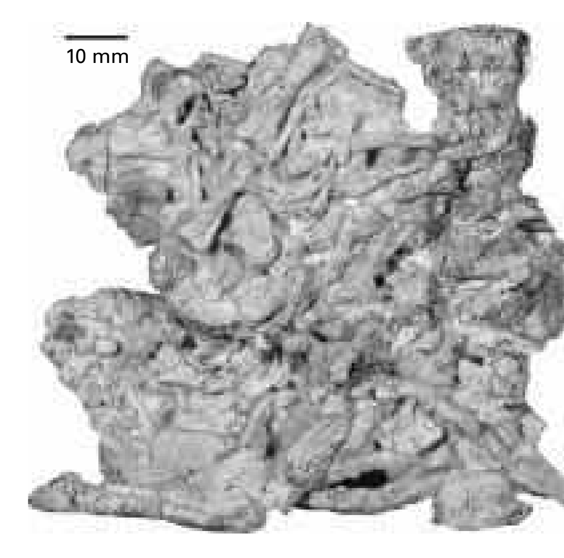
Neue Fossilien aus China beweisen: Kreidezeitliche Säuger waren teils größer als bisher angenommen und fraßen nicht nur Insekten – auf ihrem Speiseplan standen auch schon mal Dinosaurierjunge.

Von Charles Q. Choi

Bei frühen Säugetieren denken Biologen an maus- bis rattengroße Geschöpfe, die sich vor den Dinosauriern verkrochen, damit die schrecklichen Echsen nicht Hackfleisch aus ihnen machten. Nun aber sieht es so aus, als ob die Gejagten auch manchmal zu Jägern wurden. Neu entdeckte Fossilien zeigen unter anderem ein Dinosaurierjunges im Magen eines Säugers – der erste handfeste Beweis einer Beute-Räuber-Beziehung, die das bisherige Bild auf den Kopf stellt.

Der Räuber war in diesem Fall ein Tier namens *Repenomamus robustus*, das etwa die Größe eines Opossums hatte und vor rund 130 Millionen Jahren in der Kreidezeit lebte. Sein Skelett fand sich in der Yixian-Formation in der nordostchinesischen Provinz Liaoning, die bekannt ist für Fossilien gefiederter Echsen, aus denen die Vögel hervorgingen. Das Erstaunliche daran: Unterhalb des Brustkorbs lagen fremde Knochen, die zu einem jungen Dinosaurier gehörten. Sie stammten von Vorder- und Hinterbeinen sowie Zehen und Zähnen und ließen sich einem *Psittacosaurus* zuordnen, einem friedlichen Pflanzenfresser, der im ausgewachsenen Zustand etwa so groß war wie eine Kuh.

Während das Skelett von *Repenomamus* mit weit gehend intakter Anatomie erhalten ist, befinden sich die Knochen des Dinosauriers größtenteils zerbrochen und wahllos zusammengewürfelt, aber dicht gepackt dort, wo einst der Magen des Säugers war. »Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass er gefressen wurde«, mutmaßt Jin Meng. Der Paläontologe vom Amerikanischen Museum für Naturgeschichte in New York hat seine überraschenden Befunde zusammen mit chinesischen Kollegen kürzlich in der Fachzeitschrift »Nature« veröffentlicht *(13.1. 2005, S. 149)*.



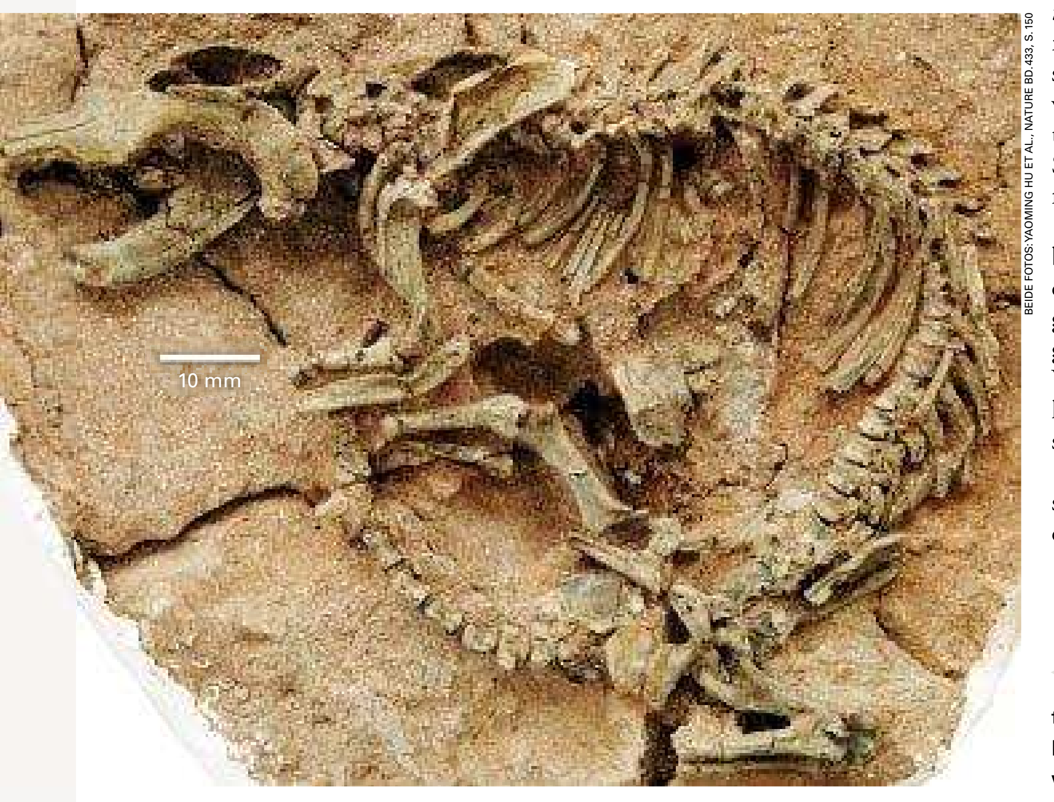
Fossilien mit Mageninhalt sind selten. Bisher wurden nur Dinosaurierskelette mit Gebissen von Säugern im Bauch entdeckt. »Hier ist es genau andersherum«, kommentiert Meng den neuen Fund.

Dabei hatte *R. robustus* sogar noch stattlichere Verwandte, denen es gleichfalls zuzutrauen ist, dass sie Dinosaurier verspeisten. Unter diversen spitzmausartigen Säugern von Dackelgröße, die Bauern in der Yixian-Formation ausgegraben hatten, stießen die Forscher auf ein – nach kreidezeitlichen Maßstäben – geradezu riesenhaftes Tier.

Dazu passend tauften sie es *R. giganticus*. Mit einer Länge von mehr als einem Meter und einem Gewicht zwischen zwölf und vierzehn Kilogramm war der Säuger so groß wie ein Beutelteufel. Der sechzehn Zentimeter lange Schädel hatte den anderthalbfachen Umfang desjenigen von *R. robustus*.

»Größe bedeutet vielerlei. Die Tiere brauchten mehr Nahrung und ein ausgedehnteres Revier. Zudem konnten sie größere Beute verzehren und sich besser gegen Fleisch fressende Dinosaurier zur Wehr setzen«, erläutert Meng. »Vielleicht lebten sie auch länger und konnten schneller laufen.«

Die neuen Fossilien waren in Sandstein eingebettet, der mit Vulkanasche durchsetzt ist. Skelette aus den Schichten



BEIDE FOTOS: YAOMING HU ET AL., NATURE BD. 433, S. 150

Die kreidezeitlichen Säuger erreichten teils die Größe eines Beutelteufels. Dieses Fossil des mehr als einen Meter langen *Repenomamus giganticus* wurde jetzt in China entdeckt.

Dieser versteinerte Brei aus fragmentierten Knochen eines Dinosaurierjungen fand sich in der Magengegend eines Säugetierfossils. Offenbar hatte der opossumgroße Räuber der Art *Repenomamus robustus*, der vor etwa 130 Millionen Jahren in China lebte, die kleine Echse hastig hinabgeschlungen.

über den Säugerknochen erscheinen platt gedrückt. Vermutlich sind die Tiere in einem See ertrunken, wo sie am Boden von einer wachsenden Schlammschicht zerquetscht wurden. Dagegen haben sich die Skelette von *Repenomamus* in ihrer natürlichen dreidimensionalen Gestalt erhalten. Wahrscheinlich wurden sie bei einem Vulkanausbruch sehr schnell von einer dicken Ascheschicht umschlossen.

Natürlich bestünde auch die Möglichkeit, dass die Repenoma-Familie zu den Aasfressern gehörte. Doch Meng verweist auf die lange, spitze Schnauze und die scharfen, dolchartigen Zähne der Säuger. Damit konnten sie andere Tiere gut fangen, festhalten und in Stücke reißen – was eher auf Räuber als auf Aasfresser hinweist. Da die langen Röhrenknochen des Dinosauriers teils noch intakt waren, muss *Repenomamus* große Brocken am Stück hinuntergeschlungen haben. Der Schädel des Opfers war immerhin ein Drittel so lang wie der des Räubers – »keineswegs ein kleiner Happen«, wie Meng meint, sondern eine schwer verdauliche Mahlzeit, die jeder verschmäht hätte, der nicht daran gewöhnt war. Außerdem sind Aasfresser unter Säugern relativ selten: Von den heutigen Fleisch fressenden Säugetieren vergreifen sich nur zwei Hyänenarten manchmal auch an Kadavern.

Der Paläontologe Zhe-Xi Luo vom Carnegie-Museum für Naturgeschichte in Pittsburgh wertet die Befunde als ersten eindeutigen Beweis dafür, dass die frühesten Vorfahren der modernen Tierwelt nicht nur Insekten erbeuteten. Sein Kollege Spencer Lucas am Museum für Naturgeschichte von New Mexico pflichtet ihm bei: »Die Dinosaurier gelten oft als Herrscher über das Erdmittelalter, aber dies zeigt, dass auch Säuger ein Dino-McNugget zu schätzen wussten.«

Charles Q. Choi ist freier Wissenschaftsjournalist in New York.

NACHGEHAKT

Die unendliche Schauer-Geschichte

Wie ein Bronzezeitexperte gegen die Himmelsscheibe von Nebra kämpft

Wir befinden uns im Jahr 2005 n. Chr. Die ganze Welt ist von der Himmelsscheibe begeistert … Die ganze Welt? Nein! Ein von unbeugsamer Skepsis erfüllter Archäologe hört nicht auf, die Echtheit des Sensationsfunds anzuzweifeln …

Peter Schauer lehrt Vor- und Frühgeschichte an der Universität Regensburg. Seitdem er nicht im wissenschaftlichen Diskurs, sondern über Leserbriefspalten von Zeitungen und TV-Interviews verkündet, die Scheibe sei eine Fälschung, liegt er mit etlichen seiner Kollegen im Clinch.

Einen Höhepunkt erreicht der Streit Ende Februar, als Schauer als Sachverständiger vor dem Landgericht Halle auftritt. Standhaft versichert er, die Scheibe sei nicht in einem geschlossenen Fund geborgen worden. Deshalb komme ihr als Einzelstück nur ein Materialwert zu. Ferner sei sie wegen der zu dünnen Patina leicht als Produkt aus moderner Zeit zu entlarven. Zudem seien die Löcher am Rand nicht mit prähistorischen Werkzeugen herzustellen, sondern nur mit modernen Maschinen – durch Einschlagen »in ein Gesenk«. Und die Beschädigungen der Scheibe stammten nicht vom Hammer der Raubgräber, sondern von einer Fräse.

Mit dieser Meinung steht Schauer ziemlich allein da. Was die Zunft der Archäologen besonders erzürnt: Der Professor hat die Scheibe selbst nie in der Hand gehabt, nie Analysen von den an den Untersuchungen beteiligten Wissenschaftlern angefordert und sogar die Einladung zu einem Kongress abgelehnt. Schauer kontert: Für seine Bewertung reichten die veröffentlichten Fotos aus, die er zudem »unter dem Mikroskop untersucht« habe.

Derlei Absonderliches aus dem Mund eines Wissenschaftlers lässt die Bronzezeitexperten, die sich im Gerichtssaal versammelt haben, nur mit dem Kopf schütteln. Gerade noch hatten sie und dutzende andere Fachkollegen tagelang mit großem Ernst über die Bedeutung der wohl 3600 Jahre alten Himmelsscheibe diskutiert. Jetzt müssen sie Lacher unterdrücken, teils auch hochsteigende Galle runterschlucken.

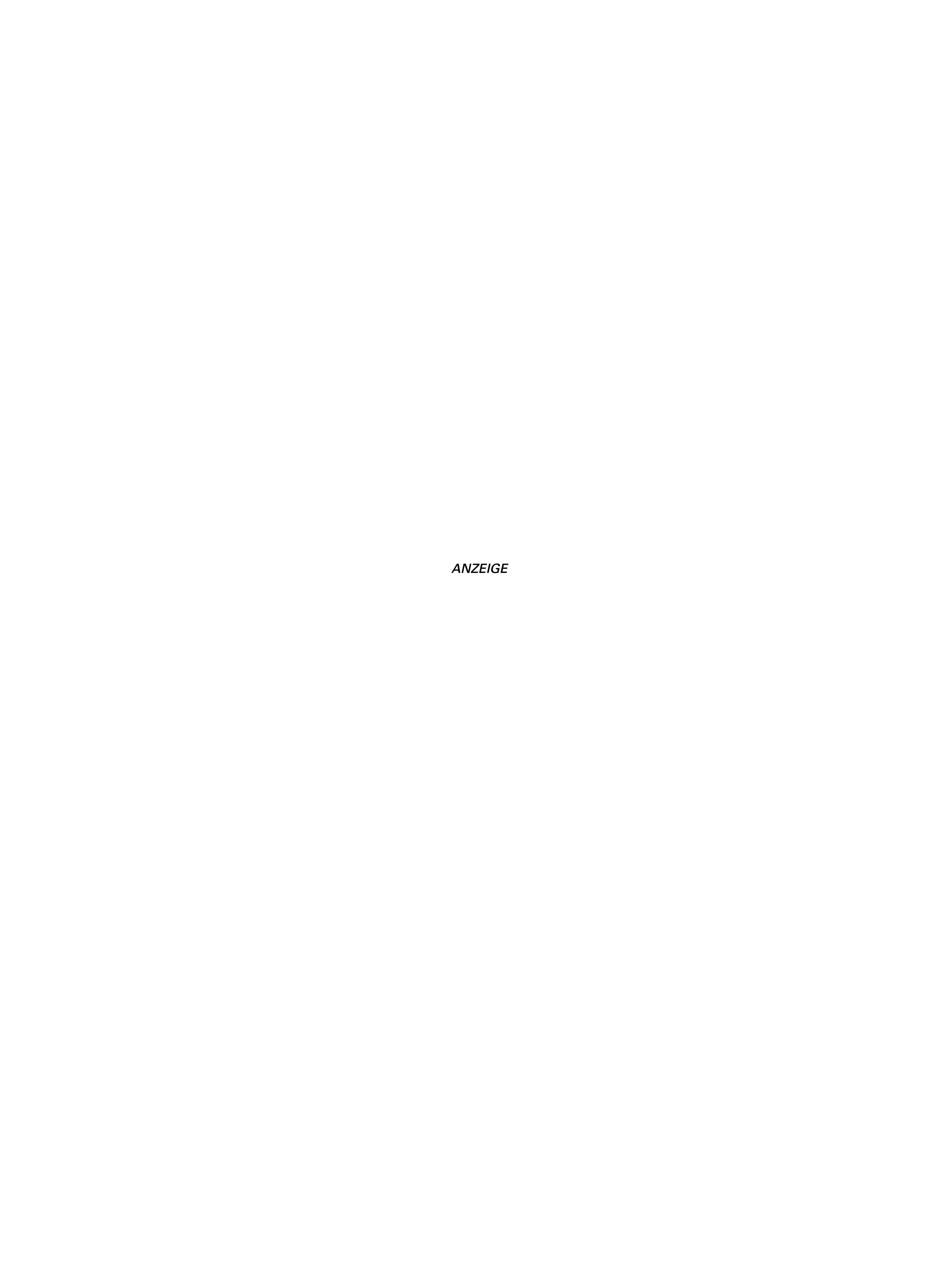
Christian-Heinrich Wunderlich hingegen nimmt die Sache sportlich. Der Materialkundler aus Halle gibt mit sichtlichem Vergnügen Nachhilfe in bronzezeitlicher Technik: Vor den Augen aller legt er im Gerichtssaal eine Scheibe aus Weichbronze auf ein Stück Holz, setzt einen Bolzen aus Hartbronze an – und mit wenigen Hieben hat er ein Loch gehämmert. Den entstandenen Grat schleift er mit einem Sandstein ab. Voilà: So entstand die Randlochung. Ein weiteres Probestück traktiert Wunderlich mit einem Maurerhammer – und erzeugt genau die Spuren, wozu laut Schauer eine Fräse nötig wäre.

Königlich-bayerisches Amtsgericht? Mitnichten. Auf der Anklagebank sitzen eigentlich zwei Personen aus Nordrhein-Westfalen – wegen »Hehlerei mit einem bedeutenden Kulturgut«. Im Berufungsverfahren behaupten ihre Verteidiger nun, die Himmelsscheibe sei gar nicht echt. Die Strategie ist klar: Eine gefälschte Scheibe ist kein Kulturgut – und die Anklage somit hinfällig.

Willkommene Argumentationshilfe liefert Schauer. Doch noch einen zweiten Professor hat die Verteidigung aufgeboten: Josef Riederer vom Rathgen-Forschungslabor der Staatlichen Museen zu Berlin. Statt die Fälschungsthese zu stützen, räumt der Spezialist für Patina und Echtheitsprüfungen ein: Die Himmelsscheibe stamme zweifelsfrei aus der Bronzezeit.

Unabhängig von allen juristischen Querelen bleibt die Frage: Warum stellt sich Schauer ins Abseits? Er selbst beklagt, durch die Himmelsscheibe würden aus Bayern Forschungsgelder der DFG abgezogen und gingen nun in ein »zweifelhaftes« Projekt nach Sachsen-Anhalt. Kollegen von ihm ergänzen: Die Himmelsscheibe passe nicht in Schauers Weltbild, weil sie einen Teil seines Lebenswerks in Frage stelle.

Der Autor **Uwe Reichert** ist Physiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.


ANZEIGE


ANZEIGE

EPIDEMIOLOGIE

Rückschlag im Kampf gegen Polio

Politisch-religiös motivierte Widerstände verzögern die Ausrottung der Kinderlähmung, ja drohen das drei Milliarden Dollar teure WHO-Projekt zum Scheitern zu bringen – eine Tragödie vor allem für die Entwicklungsländer.

Von Christine Soares

Feierstimmung herrschte am Sitz der WHO in Genf. Die Gesundheitsminister der letzten sechs Länder, in denen noch Polioviren zirkulierten – Afghanistan, Indien, Pakistan, Ägypten, Nigeria und Niger –, hatten sich am 15. Januar 2004 eingefunden, um einen öffentlichen Count-down einzuläuten. Nach 15 Jahren und dem Einsatz von drei Milliarden Dollar wollte die Global Polio Eradication Initiative bis Ende des Jahres die Übertragung des »Wildvirus« zum Stoppen bringen. Der Tag schien nahe, an dem die Kinderlähmung dasselbe Schicksal ereilen würde wie die Pocken (Blattern), die 1980 offiziell für besiegt erklärt worden waren.

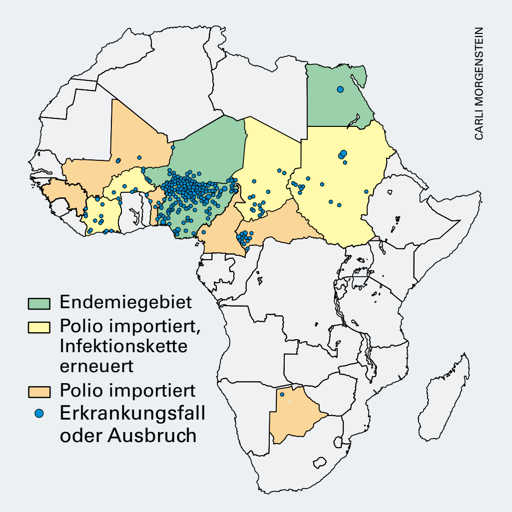
Doch die Zuversicht trog. Polio hat sich als weitaus tückischere Krankheit erwiesen, und die heutige Welt unterscheidet sich von der in den 1970er Jahren. Und so ist die Kinderlähmung über ein Jahr nach Beginn des Count-downs nicht etwa ausgerottet, sondern sogar wieder auf dem Vormarsch: Von sechs Ländern hat sie sich auf 13 ausgeweitet.

Zwar habe sich das Polioprogramm in vielen schwierigen Regionen bewährt, meint Donald A. Henderson von der Universität Pittsburgh, der seinerzeit das Projekt zur Ausrottung der Pocken leitete und bei der Initiative zum Ausmerzen der Kinderlähmung nun für Nord- und Südamerika zuständig ist. »Aber jetzt sind wir in schweres Fahrwasser geraten.«

Die Turbulenzen begannen im Sommer 2003 im Norden Nigerias. Im Bundesstaat Kano bezeichneten Politiker und Geistliche die Polioimpfung als westliche Hinterlist. Das Serum sei mit HIV verunreinigt und enthalte Hormone, die moslemische Frauen unfruchtbar machen. Der resultierende Widerstand gegen das Ausrottungsprogramm verzögerte die Immunisierung um elf Monate. Dadurch breitete sich die Krankheit bis zum Sommer 2004 in zehn umgebende Nationen aus, die jahrelang poliofrei gewesen waren (siehe Kasten). Fast 700 Kinder erlitten Lähmungen, und in vier Ländern setzte sich Polio wieder fest.

Im Oktober startete die Initiative schließlich eine groß angelegte Kampagne, bei der eine Million Freiwillige in 23 afrikanischen Staaten versuchten, bis zum Jahresende 80 Millionen Kinder zu impfen. Der unerwartete Rückschlag kostete das Ausrottungsprogramm, das ohnehin unter knappen finanziellen Mitteln leidet, weitere 100 Millionen Dollar. Das Ziel, weltweit die Übertragung des Wildvirus zu beenden, musste auf Ende dieses Jahres verschoben werden.

Auf zum letzten Gefecht



Im vergangenen Jahr wurde das Poliovirus aus Nigeria in zehn poliofreie Länder exportiert.

Das Poliovirus grassiert derzeit noch in Indien, Pakistan, Afghanistan, Nigeria, Niger, Ägypten, der Elfenbeinküste, Burkina Faso, dem Tschad und dem Sudan. Diese Staaten hoffen die Seuche bis Ende 2005 auszurotten. Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) will dann drei Jahre warten, bis sie die Krankheit für besiegt erklärt. Danach sind alle Polioimpfungen einzustellen und die verbliebenen Seren zu vernichten. Das Lebendvirus des Vakzins kann nämlich in die pathogene Form zurückmutieren. Mindestens vier Polioausbrüche in der Vergangenheit waren auf den Impfstoff selbst zurückzuführen. Deshalb gilt es zu verhüten, dass die Krankheit nach ihrer Ausrottung durch unnötige Impfungen neu aufflackert.

Politischer Wille entscheidend

David L. Heymann von der Weltgesundheitsorganisation hält es für »biologisch machbar«, das neue Datum einzuhalten. Seit der Epidemiologie-Veteran Mitte 2003 das Polioprogramm übernahm, musste er feststellen, dass der entscheidende Faktor der politische Wille ist. Folglich hat er einen großen Teil seiner Zeit darauf verwendet, die Trommel für die offizielle Unterstützung der Initiative zu rühren.

Einer seiner ersten Erfolge war denn auch die Billigung des Programms durch die Organization of the Islamic Conference (OIC), in der 56 moslemische Staaten zusammengeschlossen sind. In dieser Konföderation ist Polio ein ernstes Problem: Zu ihr gehören fünf der sechs Länder, in denen die Krankheit zuletzt noch endemisch war, und zwei, in denen sich das Virus wieder festgesetzt hat. Malaysia und die Vereinigten Arabischen Emirate, beide Mitglieder der OIC, förderten die Ausrottungsinitiative im vergangenen Jahr mit jeweils einer Million Dollar.

Dies hat auch den Widerstand in Nigeria aufgeweicht. Vor einem Jahr erklärten sich die Regierungsvertreter im Bundesstaat Kano damit einverstanden, die Impfungen wieder aufzunehmen. Allerdings machten sie eine große Aktion daraus, indem sie das Vakzin vom moslemischen Indonesien kauften und es für Sicherheitstests nach Indien schickten. Das ist umso widersinniger, als Indien, wo die Kinderlähmung weiterhin grassiert, immer noch zwei Zwischenfälle aufklären muss, bei denen lokal produzierte Seren versehentlich oder gezielt mit einem virulenten Stamm des Polio-Wildvirus verunreinigt wurden.



UNICEF / HQ04-0733 / MUDI YAHAYA

Ein mobiles Immunisierungsteam im Norden Nigerias trägt versiegelte Kartons mit einem oralen Polioserum während einer großen Impfkampagne Anfang Oktober letzten Jahres.

Das Zieldatum Ende 2005 in Afrika einzuhalten, wird laut Henderson eine »heroische Anstrengung« erfordern. Die 13 afrikanischen Länder, in denen es im vergangenen Jahr Krankheitsausbrüche gab, sind flächenmäßig größer als die 48 zusammenhängenden Staaten der USA und haben eine Bevölkerung von rund 300 Millionen.

Jetzt oder nie

Da Polio nur bei einem von 200 Opfern eine erkennbare »akute schlaffe Lähmung« verursacht, ist die Krankheit sehr viel schwieriger aufzuspüren als die Pocken. 800 dokumentierte Fälle in Afrika bedeuten demnach, dass vermutlich 160 000 Menschen infiziert waren.

Die Situation in den asiatischen Endemiegebieten stellt sich weitaus besser dar. Anfang November letzten Jahres gab es in Indien nur noch 81 dokumentierte neue Fälle. Hier und in den beiden anderen betroffenen Staaten – Pakistan und Afghanistan – sollte es laut Heymann gelingen, die Impfkampagnen noch in diesem Frühjahr abzuschließen und so die Ausbreitung des Wildvirus zu stoppen. Nun komme es entscheidend darauf an, dass in Afrika das Gleiche bis Jahresende geschieht. »Entweder die Länder machen es jetzt«, warnt er, »oder es wird gar nicht passieren. Eine solche Chance wird es nie wieder geben.«

Die Probleme mit dem Polioprogramm scheinen bereits Schatten auf das langfristige Bemühen geworfen zu haben, sukzessive alle viralen Kinderkrankheiten auszurotten. Die Masern sollten als Nächstes an die Reihe kommen, doch heute ist – so Heymann – nur noch von einer Verringerung der Sterblichkeit und vom Schritthalten die Rede.

»Vielleicht waren wir zu sehr auf das Ziel der totalen Ausrottung fixiert«, räumt Henderson trotz seines eigenen Erfolgs bei Pocken und Polio ein. Der Seuchenexperte verweist auf die enormen Fortschritte in der Kontrolle von Kinderkrankheiten wie Neugeborenen-Tetanus und Röteln, die sehr ermutigend seien, auch wenn sich ein endgültiger Sieg über die Erreger noch lange nicht abzeichne. Seiner Ansicht nach ist es denn auch schon ein großer Erfolg des Polioprogramms, dass es »den Ländern gezeigt hat, was eine großflächige Immunisierung leisten kann, wenn man die gesamte Bevölkerung dafür mobilisiert«.

Christine Soares gehört der Redaktion von Scientific American an.

KLIMAGESCHICHTE

Historische Temperaturwellen

Anscheinend war das Klima in den vergangenen 2000 Jahren wechselhafter als bisher gedacht. Das ergibt sich aus der Rekonstruktion des Temperaturverlaufs mit einer neuartigen Methode, die Daten von Baumringen und Sedimenten kombiniert.

Von Sven Titz

Wie sich das Klima in den vergangenen 150 Jahren entwickelt hat, lässt sich anhand von Messwerten ziemlich genau verfolgen. Demnach ist es in diesem Zeitraum auf der Nordhalbkugel um etwa 0,8 Grad Celsius wärmer geworden. Was die letzten zwei Jahrtausende angeht, bleibt das Auf und Ab der Temperatur jedoch Gegenstand einer lebhaften Debatte – Ausgang offen.

Kräftig angefacht wurde die Diskussion jetzt durch ein schwedisch-russisches Team, das mit einem neuartigen Verfahren die Klimaarchive der Natur kombinierte, um den Temperaturverlauf auf der Nordhemisphäre zu rekonstruieren. Das Ergebnis ist überraschend: Die Klimaschwankungen im letzten Jahrtausend scheinen demnach doppelt so stark gewesen zu sein wie bislang angenommen *(Nature, Bd. 433, S. 613)*.

Heikle indirekte Klimazeugen

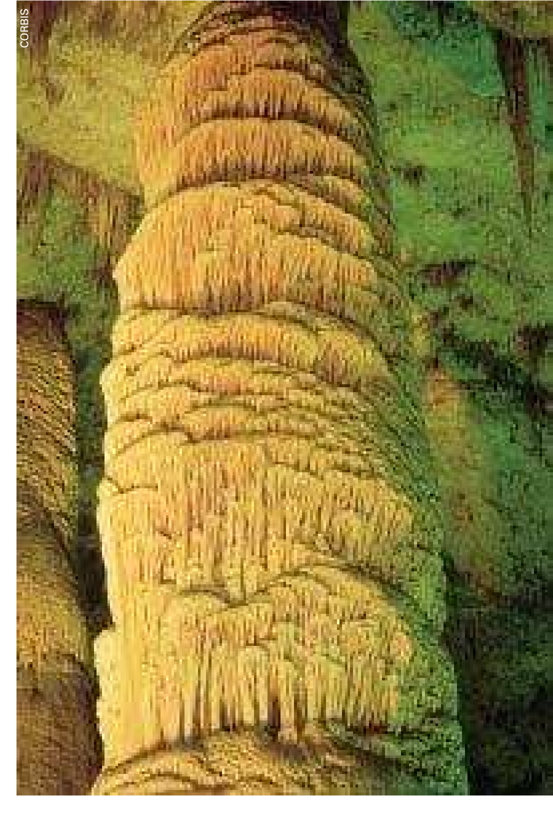
Weil es den Paläoklimatologen an direkten Informationen über den einstigen Erwärmungsgrad der Atmosphäre mangelt, sammeln sie in detektivischer Kleinarbeit eine Fülle von Indizien. Dabei greifen sie auf indirekte Klimazeugen zurück, die sie als Proxys (englisch für Stellvertreter) bezeichnen. Baumringe zählen ebenso dazu wie Korallen – desgleichen Eisbohrkerne von den Polen oder Gletschern sowie Ablagerungen in Meeren oder Seen. Solche Sedimente enthalten zum Beispiel Planktonarten (Foraminiferen), Muscheln, Kieselalgen und Pollen, die Aufschluss über die einstigen Lebensbedingungen und damit auch die Temperaturverhältnisse geben. Selbst die Wachstumsschichten der Stalagmiten in Tropfsteinhöhlen bergen Informationen über das frühere Klima.

Das hartnäckigste Problem, das sich den Fachleuten dabei stellt, besteht in der Eichung der Proxydaten. Was die Paläoklimatologen messen, ist zum Beispiel das Mengenverhältnis bestimmter Isotope in Eisbohrkernen oder Kalkschichten von Stalagmiten. Nun wissen sie zwar, dass zwischen dieser Größe und der Temperatur, die beim Gefrieren des Wassers oder bei der Kalkablagerung in der Atmosphäre herrschte, ein Zusammenhang besteht. Aber die genaue Relation müssen sie durch Vergleich mit exakten Messdaten ermitteln. Dafür stehen allerdings nur die vergangenen 150 Jahre zur Verfügung, aus denen genügend Thermometerablesungen vorliegen.

Hier nun fängt das Dilemma an; denn es ist ungewiss, ob die für Temperaturänderungen auf dieser kurzen Zeitskala gefundene mathematische Beziehung auch für Schwankungen im Jahrhundert- oder Jahrtausendbereich gilt. Zum Beispiel sind sich Dendrochronologen – Fachleute für Rekonstruktionen anhand von Baumringen – noch ziemlich uneins darüber, inwieweit sich eine Eichung am Gezappel der Kurven von Jahr zu Jahr auf langfristige Trends übertragen lässt. Ähnliche Unsicherheiten herrschen praktisch bei allen Proxydaten. Bei der Dendrochronologie kommen Überlappungsprobleme hinzu: Bäume werden in der Regel weniger als 2000 Jahre alt, weshalb man die Daten aneinander stückeln muss. Dabei darf etwa die Tatsache, dass junge Exemplare schnell und alte langsamer wachsen, die Resultate nicht verfälschen.

Zeitreihenanalyse mit Wavelets

Aus diesen Gründen haben Anders Moberg von der Universität Stockholm und seine teils russischen Kollegen auf eine mathematische Methode zurückgegriffen, die vor allem aus der digitalen Bildverarbeitung bekannt ist, wo sie zur Datenkompression benutzt wird. Dabei dienen so genannte Wavelets (»Wellchen«) dazu, das Schwingungsverhalten von Systemen – seien es Strukturen in Bildern oder Muster in Zeitreihen – auf verschiedenen Skalen zu ermitteln und


CORBIS

zu beschreiben. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie – im Unterschied zur konventionellen Fourier-Analyse – auch dann noch funktioniert, wenn der zu Grunde liegende Vorgang keine gleich bleibenden statistischen Eigenschaften besitzt, also nicht stationär ist. Darauf aber kommt es bei der Rekonstruktion des Klimas an; denn zwei wichtige externe Prozesse, die den Energiehaushalt der Atmosphäre beeinflussen – Schwankungen der Sonneneinstrahlung und Vulkanausbrüche –, sind beide instationär.

Mit Hilfe einer so genannten Wavelettransformation kombinierte das Team um Moberg also die verschiedenen Proxydaten und gewichtete sie je nach der Zeitskala, auf der sie mutmaßlich mit der Temperatur zusammenhängen. Entsprechend wurden die Baumringe praktisch nur für kurzfristige Schwankungen herangezogen, Sedimentfunde in Seen und Meeren, Eisbohrkerne und Stalagmiten dagegen für die langfristigen Fluktuationen verwendet. Diese Auswahl ist sicherlich bis zu einem gewissen Grad subjektiv, berücksichtigt aber die oben geschilderten Stärken und Beschränkungen der betreffenden Proxys – wie die Probleme mit der Vergleichbarkeit von Baumringen über lange Zeiträume oder die geringe zeitliche Auflösung der Sedimentdaten, weshalb diese früher oft im Vorhinein aus der Analyse herausfielen.

Das Resultat der Untersuchung weist in eine Richtung, in welche die Paläoklimatologie schon seit einiger Zeit vorsichtige Schritte unternimmt. Demnach hat





Baumringe, Eisbohrkerne und sogar Tropfsteine bergen Informationen über das einstige Klima, die sich allerdings in ihrer Zeitskala unterscheiden. Deshalb war es bisher schwierig, sie gemeinsam für Rekonstruktionen des Temperaturverlaufs heranzuziehen.

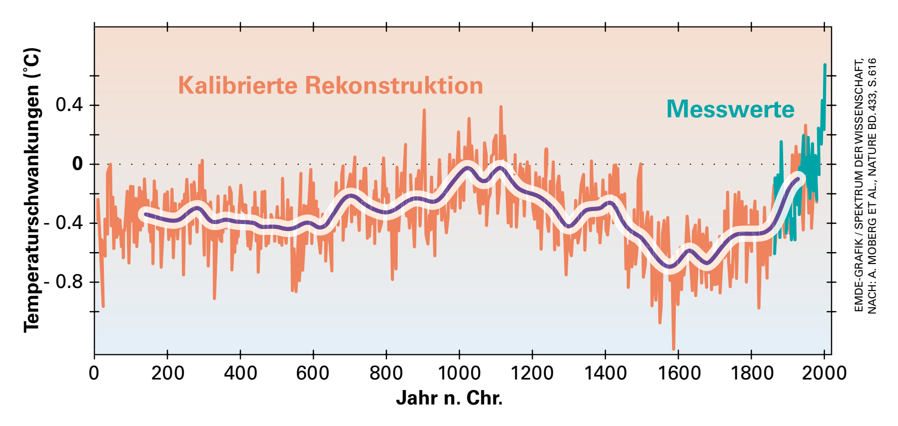
es in der Vergangenheit stärkere Klimaschwankungen gegeben, als frühere Rekonstruktionen nahe legten. Folgt man der Waveletmethode, dann beträgt die Amplitude der Temperaturschwingung in den vergangenen tausend Jahren rund ein Grad Celsius. Das ist ungefähr doppelt so viel wie der Wert in der populär gewordenen, neuerdings aber umstrittenen Studie von Michael E. Mann, Raymond S. Bradley und Malcolm K. Hughes aus dem Jahr 1998 *(Nature, Bd. 392, S. 779)*. Darin gleicht der Temperaturverlauf einem Hockeyschläger – mit einem weit gehend geraden, waagrechten Stiel für die vorindustrielle Zeit und der jäh nach oben abbiegenden Keule ab dem 19. Jahrhundert.

Der neuen Analyse zufolge lagen die Temperaturen auf dem Höhepunkt der Kleinen Eiszeit – um das Jahr 1600 – ungefähr 0,7 Grad Celsius unter dem hochmittelalterlichen Niveau. Dieses Ergebnis deckt sich in etwa mit dem einer Untersuchung, die ein Team um Hans von Storch am GKSS-Forschungszentrum in Geesthacht schon im vergangenen Sommer publizierte.

Statistische Mängel früherer Rekonstruktionen

Die GKSS-Wissenschaftler hatten einen Teil der herkömmlichen Rekonstruktionsmethoden einem rigorosen Test mit einem Computermodell unterzogen und dabei statistische Mängel aufgedeckt, die bis dahin nur teilweise bekannt waren. Insbesondere zeigten sie, dass die bisher üblichen Regressionsmethoden – in einfacher Form die bekannte Ausgleichsgerade, die Physiker durch ihre mehr oder weniger streuenden Datenpunkte ziehen – unter bestimmten Bedingungen die Variabilität auf langen Zeitskalen unterschätzen können.

Moberg und seine Kollegen knüpfen explizit an diese Studie an. Doch auch sie können den Schwachpunkt jeder Rekonstruktion – die Eichung der Proxydaten – nicht aus der Welt schaffen. Davon sind vor allem die langfristigen Schwankungen der Sedimentdaten betroffen. Wenn nur 150 Jahre exakt gemessener Werte für die Kalibrierung zur ▷



Laut einer neuen Rekonstruktion (rot), die mit einer so genannten Wavelettransformation sämtliche indirekten Klimazeugen einbezog, schwankte die mittlere Temperatur auf der Nordhalbkugel in den vergangenen 2000 Jahren um etwa ein Grad. Die rasante Erwärmung im 20. Jahrhundert zeigt sich klar in den Thermometermessungen (grün).

Verfügung stehen, entspricht das bei Variationen mit einer Schwingungsdauer von 300 Jahren nicht einmal einer halben Periodenlänge.

Datenanalytiker runzeln da die Stirn. Keith Briffa von der Universität von East Anglia in Norwich hält es außerdem für nicht gerechtfertigt, die langsamen Schwingungen in den Baumringdaten weit gehend unter den Tisch fallen zu lassen. Immerhin aber bietet die Waveletmethode Möglichkeiten zur Kombination verschiedenartiger Proxys, die es vorher in dieser Form nicht gab.

Auch die neue Studie wird kaum das letzte Wort bleiben. Die Suche nach immer neuen Proxydaten und der perfekten Methode hält an. Vor allem aber gibt auch die jetzige Analyse keineswegs Entwarnung in Sachen globale Erwärmung. Vielmehr bestätigt sie das Ungewöhliche des momentanen Temperaturtrends: Auch bei größerer Klimavariabilität in der Vergangenheit waren die letzten 15 Jahre wärmer als jeder andere Abschnitt in den vorhergehenden zwei Jahrtausenden. Selbst das Klimaoptimum des Mittelalters reicht nicht an das heutige Niveau heran.

Warum das so ist – diese Frage berührt einen anderen Schwerpunkt der Debatte, nämlich die Diskussion darüber, inwieweit der Mensch durch die Emission von Treihausgasen die momentane Erderwärmung selbst verschuldet hat. Klimaschwankungen vor der industriellen Revolution müssen natürliche Ursachen haben. Zum Beispiel schirmen Vulkanausbrüche durch die ausgestoßenen Teilchen die Sonne ab, aber auch die solare Aktivität selbst schwankt geringfügig über die Jahrhunderte.

Anhand von Ascheablagerungen haben Forscher versucht, den Einfluss von Vulkanen auf das frühere Klima zu rekonstruieren. Und wie kräftig die Sonne schien, lässt sich im Prinzip über Berylliumisotope sowie die Aufzeichnungen von Sonnenfleckenzahlen erschließen, wobei Letztere aber auch erst aus neuerer Zeit lückenlos vorliegen. Trotzdem herrscht über die Amplitude der Sonneneinstrahlung in den vergangenen zwei Jahrtausenden keineswegs Einigkeit: Die unter Fachleuten kursierenden Werte variieren um den Faktor drei und mehr.

Der Einfluss natürlicher Vorgänge auf kurzfristige Klimaschwankungen ist demnach sogar mit noch größeren Unsicherheiten behaftet als das Ausmaß der Temperaturfluktuationen selbst. Darum erscheinen alle Bemühungen höchst prekär, aus den zurückliegenden Jahrhunderten Rückschlüsse darauf ziehen zu wollen, wie empfindlich das Klimasystem auf natürliche oder menschengemachte Störungen des irdischen Strahlungshaushalts reagiert. Anders gesagt ist das Ausmaß der Temperaturschwankungen im vergangenen Jahrtausend für die momentane Klimadiskussion letztlich nicht entscheidend. Das Herzstück der Szenarien für das treibhausgeplagte 21. Jahrhundert bleiben die physikalisch fundierten Computermodelle sowie die Temperaturaufzeichnungen der letzten 150 Jahre – und die lassen an Deutlichkeit nichts zu wünschen übrig.

Sven Titz ist promovierter Meteorologe und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

ZEITRECHNUNG

Immer wieder sonntags ...

Ein US-Physiker schlägt einen neuartigen Kalender vor. Dessen größter Vorteil: Er bleibt jedes Jahr gleich. Dafür muss alle fünf oder sechs Jahre eine zusätzliche Woche eingeschaltet werden.

Von Gerhard Samulat

Wenn am Jahresanfang ein neuer Kalender herauskommt, sehen viele Menschen zunächst einmal nach, an welchem Wochentag sie oder ihre Lieben Geburtstag feiern. Gibt es doch nichts Angenehmeres, als nach einer richtig gelungenen Party am nächsten Morgen ausschlafen zu können, weil Wochenende ist. Doch wenn es nach Richard C. Henry von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) geht, braucht sich darüber künftig niemand mehr Gedanken zu machen: Bei dem radikal neuen Kalender, den der US-Physiker vorschlägt, fällt jeder Wochentag Jahr für Jahr stets auf das gleiche Datum. Der 1. April zum Beispiel wäre dann immer an einem Sonntag – ebenso wie der erste Weihnachtsfeiertag oder Neujahr.

Wie das geht? Ganz einfach: Das Jahr soll künftig nur noch 364 statt 365 Tage zählen. Das Schöne an der Zahl 364 ist, dass sie sich durch sieben teilen lässt. Ein Jahr dieser Länge zerfällt deshalb in genau 52 Wochen. Aus diesem Grund wandert das Datum nicht mehr über die Wochentage.

Da auch die bisherigen 365 Tage eine bloße Näherung an die tatsächliche Dau-

er des Umlaufs der Erde um die Sonne sind – das (tropische) Jahr beträgt ziemlich genau 365,2422 Tage –, wäre die Streichung eines Tages kein Beinbruch: Der Fehler würde nur etwas größer. Während heute in jedem vierten Jahr (mit wenigen Ausnahmen) ein Schalttag eingefügt werden muss, um die Zeitrechnung mit den astronomischen Gegebenheiten immer wieder in Einklang zu bringen, will Henry künftig alle fünf oder sechs Jahre eine zusätzliche Woche einführen, die keinem speziellen Monat angehören soll. Er schlägt vor, sie nach Newton zu benennen; schließlich konnte der Entdecker des Gravitationsgesetzes als Erster die Himmelsmechanik erklären. »Wenn es nach mir ginge, hätte in der Newton-Woche jeder frei«, meint er. Passend dazu soll diese Woche im Hochsommer zwischen Juni und Juli eingeschoben werden.

Henry verspricht sich von seiner vereinfachten Zeitrechnung viele Vorteile. Vor allem muss der Kalender nur noch ein einziges Mal aufgestellt werden; er gilt dann – abgesehen von den Newton-Wochen – für die Ewigkeit.

Das jährliche Drucken neuer Kalender erübrigt sich dadurch ebenso wie umfangreiche Planungen in den Personalabteilungen von Unternehmen und Behörden. Auch Wirtschaftsweise oder andere Statistiker brauchen ihre Bilanzen nicht jeweils unterschiedlich zu interpretieren, nur weil in einem Jahr einige Feiertage mehr auf normale Wochentage fallen als in anderen. Heute dauert es 400 Jahre, bis ein Kalender sich exakt wiederholt.

Newton-Woche statt Schalttagen

Auch die Monatslängen verteilen sich bei Henrys Vorschlag viel gleichmäßiger als bisher: Alle durch drei teilbaren Monate – also März, Juni, September und Dezember – haben 31, die anderen 30 Tage. Ausnahmen wie den jetzigen Februar gibt es nicht.

Wer an Tagen geboren wurde, die im neuen Kalender nicht mehr existieren – wie der 31. Januar –, sollte Henry zufolge den Geburtstag bereits am Vortag feiern. Alle diejenigen, die künftig in der Newton-Woche auf die Welt kommen, erleiden das gleiche Schicksal wie jene, die derzeit an einem Schalttag das Licht der Welt erblicken. »Meinetwegen können sie alle am Nationalfeiertag auf ihre Geburt anstoßen«, meint Henry, »oder sich irgendeinen anderen Tag aussuchen.«

Vorschläge für Kalenderreformen gab es in der Menschheitsgeschichte schon viele, aber nur wenige wurden auch umgesetzt. Die heute in den meisten Teilen der Welt gültige Zeitrechnung geht auf Papst Gregor XIII. zurück, der sie 1582 einführen ließ. Sie ersetzte den julianischen Kalender, den das Erste Konzil von Nizäa im Jahr 325 für verbindlich erklärt hatte. Aus dieser Zeit stammt auch die komplizierte Berechnung des wichtigsten Fixpunktes der Christenheit: das Osterfest. Es findet immer am ersten Sonntag nach dem ersten Vollmond nach jener Tag-und-Nacht-Gleiche statt, ▷

Januar						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Februar						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

März						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

April						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

Mai						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Juni						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Juli						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

August						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

September						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Oktober						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30					

November						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
		1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30			

Dezember						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
				1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31

Newton						
So	Mo	Di	Mi	Do	Fr	Sa
1	2	3	4	5	6	7

Newton-Jahre sind:
2003, 2009, 2015, 2020, 2026, 2032, 2037, 2043, 2048, 2054, 2060, 2065, 2071, 2076, 2082, 2088, 2093, 2099, 2105, 2111, 2116, 2122, 2128, 2133, 2139, 2144, 2150, 2156, 2161, 2167 …

Der von einem US-Physiker propagierte neue Kalender ist unveränderlich und besticht durch seine hohe Symmetrie. Das Jahr hat darin nur 364 Tage. Dafür wird alle fünf oder sechs Jahre zwischen Juni und Juli eine zusätzliche »Newton-Woche« eingeschoben.

die auf der Nordhemisphäre den Beginn des Frühlings markiert.

Da der julianische Kalender noch von 365,25 Tagen pro Jahr ausging, drifteten die Tag-und-Nacht-Gleiche und ihr kalendarisches Datum mit der Zeit auseinander, sodass sich der Frühlingsanfang in Richtung Weihnachten verschob. Das vermerkte schon 1543 Nikolaus Kopernikus, der Begründer unseres heliozentrischen Weltbilds, in seinem Werk »De Revolutionibus Orbium Coelestium«, auf dessen Berechnungen der gregorianische Kalender schließlich fußte. Um die Abfolge der Wochentage bei Einführung der neuen Zeitrechnung beizubehalten, musste Gregor XIII. notgedrungen zehn Tage ausfallen lassen: So folgte auf den 4. gleich der 15. Oktober. Damit – und mit einer komplizierten Regel für das Einfügen von Schaltjahren – stellte er aber sicher, dass der Frühlingsanfang künftig stets zwischen den 19. und 21. März fiel.

Weil etliche Länder – insbesondere die evangelischen – erst nach und nach die gregorianische Zeitrechnung übernahmen, kam es zu mancherlei Konfusion. So wurde das neue Jahr regional oft sehr unterschiedlich gefeiert. Noch heute deutet der Ausdruck »zwischen den Jahren« auf diese Diskrepanzen hin. Russland übernahm die moderne Zeitrechnung beispielsweise erst 1918. Daher fiel die »Oktoberrevolution« auf den 7. November des gregorianischen Kalenders, an dem sie bis zum Ende der Sowjetunion auch gefeiert wurde.

Wie groß sind die Chancen, dass die Weltgemeinschaft – per UN-Resolution zum Beispiel – Henrys Vorschlag annimmt? Das Haupthindernis besteht momentan darin, dass die Menschheit noch gar nichts ahnt von ihrem Glück. Deshalb bemüht sich Henry intensiv um Publicity – vor allem im Internet (www.ct-calendar.org/de/index.php). Zudem hat er einen Förderverein gegründet, der in vielen Ländern durch Repräsentanten vertreten ist: in Deutschland durch Wolfgang Kersten von der Firma Advanceweb. Wenn sein neuer Kalender erst bekannt genug sei, so die Überzeugung des unerschütterlichen Rationalisten, habe er alle Chancen, realisiert zu werden.

Zwar weiß auch Henry, dass sich schon viele vergeblich an Kalenderreformen versucht haben. Die meisten seien aber deshalb gescheitert, weil sie an der Siebentagewoche rüttelten, was auf große religiöse Widerstände stieß.

Religiöse Hindernisse umschiffbar?

Probleme aus christlicher Sicht könnte bei Henrys Vorschlag allenfalls der Ostertermin machen, da er sich in manchen Jahren gegenüber dem nach dem gregorianischen Kalender berechneten Datum verschieben würde. Außerdem bliebe er veränderlich, sofern man an der bisherigen Berechnungsmethode festhielte. Das aber würde durch die Hintertür wieder eine Variable in den sonst so konstanten Kalender einführen – bloß wegen des Osterfests müsste er doch jedes Jahr neu gedruckt werden.

Eine pragmatische Lösung läge nahe: Man könnte Ostern einfach auf ein fixes Datum legen, etwa den 8. April (der 1. April wäre noch eleganter, stieße aber vielleicht auf Vorbehalte, da er die Glaubwürdigkeit des Osterwunders zu untergraben droht). Dieser Termin fiele, wenn Henrys Kalender schon im nächsten Jahr eingeführt würde, immer auf einen Sonntag. Selbst dem Kirchenjahr käme diese Festlegung zugute: Im Spätwinter ausgefallene Sonntage der Nachweihnachtszeit müssten nicht mehr, wie heute, im November nachgeholt werden. Ob das aber genügt, traditionell denkende Christen zu der Änderung zu bekehren?

Aus weltlicher Sicht erscheint dagegen die Newton-Woche etwas problematisch. Natürlich kann da nicht, wie Henry das salopp vorschlägt, alle Arbeit ruhen. Als einfache Lösung bietet sich an, in einem Newton-Jahr generell eine zusätzliche Urlaubswoche vorzusehen, die aber – zumindest bei Angehörigen bestimmter Berufsgruppen wie Ärzten oder Polizisten – zu einem beliebigen Zeitpunkt genommen werden kann.

Zweifellos hat der reformierte Kalender einen gewissen Charme – auch wenn sich diejenigen, deren Wiegenfest dann immer auf einen Werktag fällt, benachteiligt fühlen dürften. Selbst für den Fall, dass Henry eine breite Öffentlichkeit erreicht, scheint es dennoch fraglich, ob sein Vorschlag sich durchsetzt: Gegen lieb gewordene Traditionen hatte die Vernunft schon immer wenig Chancen. Außerdem werden die Kalendermacher gegen die Änderung Sturm laufen, weil sie ihre Erwerbsgrundlage verlieren.

Gerhard Samulat ist freier Journalist für Wissenschaft und Technik in Wiesbaden.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer

Der Entschluss des Androiden

Die Debatte um den freien Willen braucht mehr Sciencefiction.

Ist die empirische Hirnforschung legitimiert, Aussagen über das Problem der Willensfreiheit zu machen? Seit Naturwissenschaftler wie Gerhard Roth und Wolf Singer dieses Recht beanspruchen – und sogar Konsequenzen für das Strafrecht andeuten –, ist darüber eine lebhafte Kontroverse entbrannt. Vor allem Philosophen sehen sich herausgefordert und beharren auf ihrer alleinigen Zuständigkeit für die Frage, wie naturwissenschaftlicher Determinismus und Willensfreiheit zu vereinbaren seien.



Vielleicht lohnt es, auf den festgefahrenen Frontverlauf einen schrägen Blick zu werfen. Begeben wir uns für einen Augenblick auf die Warte einer eher gering geschätzten Literaturgattung, der Sciencefiction. Sie wird seit jeher von künstlichen Wesen mit mehr oder weniger autonomer Entscheidungskompetenz bevölkert. Schon das von Doktor Frankenstein aus Leichenteilen zusammengeflickte und durch Blitzschlag zum Leben erweckte Monster brach aus dem Labor aus, litt unter seiner unvollkommenen Physis, wurde gejagt und beging Verbrechen. Schließlich beendete es seine unselige Existenz durch Flucht ins ewige Eis.

Als Mary Shelley diesen Roman 1818 veröffentlichte, kannte man noch keine Elektronik, nur Elektrizität. Ihr Monster denkt daher mit einem elektrisch stimulierten Menschenhirn. Erst mit dem Computer kommt die literarische Fiktion auf künstliche Wesen mit einem »Elektronengehirn« – und das kann im Prinzip beliebig komplex sein. Sofort stellt sich das Problem, wie sich hochintelligente Kunstwesen daran hindern lassen, ihren Konstrukteuren gefährlich zu werden.

SF-Autor Isaac Asimov formulierte dafür 1950 in der Kurzgeschichtensammlung »Ich, Robot« seine Gesetze der Robotik und malte eine Zukunft, in der autonome Maschinensklaven, durch entsprechende Programmierung im Zaum gehalten, brav ihre Arbeit tun. Der kürzlich davon inspirierte gleichnamige Film führt allerdings vor, wie Autonomie und Programmierung in Widerspruch geraten, wenn die Intelligenz ein gewisses Maß überschreitet: Die Roboter revoltieren.

Kritiker – vor allem solche, die von Sciencefiction wenig halten – wenden gern ein, so weit werde es nie kommen, weil Elektronengehirne nur Programme ausführen, aber nicht autonom handeln können. Wieder landen wir bei der Willensfreiheit, aber diesmal als Machbarkeitsproblem. Kann es Roboter geben, die so komplex sind, dass ihr Handeln auf uns Menschen spontan und »frei« wirkt?

Sciencefiction-Fans können über diese Frage nur müde lächeln. Commander Data in der Fernsehserie »Star Trek: The Next Generation« ist ein Android mit »positronischem« Gehirn. Er handelt rational und autonom, nervt die menschliche Besatzung durch pedantische Antworten und besitzt keine Gefühle. Doch bald äußert er, da auf Wissbegier programmiert, den Wunsch, menschliche Emotionen zu verstehen, und beansprucht immer mehr Gleichberechtigung. Die Besatzung gewöhnt sich daran, ihn wie einen Menschen zu behandeln.

Gewiss, nur Sciencefiction. Aber nur einmal rein theoretisch angenommen, es gäbe eines beliebig fernen Tages so etwas wie dieses positronische Gehirn: Wie geht es darin zu? Trifft der Android nicht Entscheidungen? Überlegt er nicht: Soll ich das tun, das nicht? Und wenn wir ihm vorhalten, er sei schließlich von uns programmiert, also unfrei, wird er nicht sagen: »Aber ihr habt mich doch programmiert, zu wählen! Ich muss in unübersichtlichen Situationen den einen oder anderen Entschluss fassen!« Was ist Freiheit anderes?





Mauersegler – Leben im Flug



Noch gehören Mauersegler zu unseren häufigen Sommervögeln. Allerdings vernichten zunehmend unbedachte Baumaßnahmen viele ihrer Nisthöhlen.

Von Gérard Gory

Die Lüfte sind ihr Element. Nur zum Brüten und Aufziehen des Nachwuchses müssen diese erstaunlichen Vögel landen. Bei allen anderen Aktivitäten, selbst zum Schlafen, verlassen sie möglichst ihren bevorzugten Lebensraum nicht. Vermutlich haben sie oft monatelang keinen Ast oder festen Boden unter den Füßen.

Viele verwechseln Mauersegler mit Schwalben. Dabei sind die blitzschnellen, wendigen Flugkünstler größer, haben längere, schmalere Flügel, und ihre hellen Schreie klingen unverwechselbar. Typischerweise sausen sie in Scharen umher, bald hoch in der Luft, bald durch Plätze und Straßen unserer Städte.

Biologen bezeichnen diese Vögel als Kulturfolger: Wohl jeder hat sie schon gesehen, wie sie dicht an Häusern entlangflitzen, haarscharf um Ecken biegen oder über größeren Bauwerken kreisen. Viele ihrer Brutkolonien liegen in Ortschaften. Denn besonders in altem Mauerwerk und unter Dächern historischer Gebäude finden sie heute hoch gelegene, geeignete Höhlen zum Nisten, die einen freien An- und Abflug erlauben. Türme, Burgen, Industrieanlagen oder Hochhäuser sind bevorzugte Standorte. Wegen dieser Vorlieben nennt man die Vögel auch Turmsegler oder Turmschwalben.

Mauersegler nisten auch in zerklüfteten Steilfelsen oder in nicht bewirtschafteten, alten Baumbeständen, die Höhlen bieten. Doch sind solche Plätze in unserer Kulturlandschaft selten geworden. Umso dringlicher appellieren Naturfreunde, bei der Renovierung alter Bausubstanz überkommene Nistmöglichkeiten zu erhalten oder neue anzubieten.

IN KÜRZE

▶ Mehr als die meisten Vögel ist der Mauersegler ein Bewohner der Luft. Der Flugkünstler findet dort nicht nur Nahrung, sondern auch Schlaf. Haben sich die Jungtiere einmal ins Freie gestürzt, **landen sie in der Regel viele Monate nicht wieder**.
▶ Da Mauersegler ausschließlich von **Insekten und Spinnen** leben, die sie in der Luft erwischen, verbringen sie drei Viertel des Jahres in Afrika. In Europa halten sie sich nur während der Sommermonate auf.
▶ Schlechtwetterphasen überstehen Eltern wie Nestlinge als **Hungerkünstler**. Andere Koloniemitglieder ziehen in solchen Zeiten in riesigen Schwärmen über weite Distanzen – in so genannten Wetterflügen – in günstigere Gefilde.
▶ Die **geselligen Vögel** brüten jedes Jahr mit demselben Partner. Die Flugscharen über den Brutkolonien dienen auch zu deren Schutz.

Mauersegler bleiben ihrer Kolonie gewöhnlich treu, auch wenn sie dort keine Brutgelegenheit mehr vorfinden. Weil sie viele Jahre wiederkehren, merken wir zunächst vielleicht gar nicht, ob der Nachwuchs ausbleibt. In Ostdeutschland etwa gingen in letzter Zeit auffallend viele Kolonien ein. Aus all diesen Gründen wurde dieser teilweise immer noch geheimnisvolle Vogel von den Naturschutzverbänden in Deutschland 2003 zum Vogel des Jahres gewählt.

Sommervögel in alten Städten

Seit 1980 erforschen meine Kollegen und ich in der südfranzösischen Stadt Nîmes eine der größten Mauerseglerkolonien Europas. Die Vögel nisten dort hauptsächlich beim alten Jesuitenkloster, in dem heute das Naturhistorische Museum untergebracht ist, wo ich arbeite. In der Kolonie registrieren wir zurzeit über 500 Individuen und fast 170 Nisthöhlen (siehe Bild S. 32).

Die Segler sind eine artenreiche Vogelfamilie, die – anders als die Schwalben – nicht zu den Singvögeln gehört. Drei Arten brüten regelmäßig in Europa: Der Fahlsegler *(Apus pallidus)* kommt nur ganz im Süden vor; der Alpensegler *(Tachymarptis melba)* gelangt über Frankreich etwas weiter nach Norden bis in die Region Freiburg; der Mauersegler *(Apus apus)* hingegen ist in fast ganz Europa heimisch. Verbreitet ist er von Nordafrika bis nach Skandinavien, über die gesamte gemäßigte Klimazone Euro-

pas bis nach Mittelasien. Der Mauersegler brütet in Lappland jenseits des Polarkreises bis zum siebzigsten Breitengrad. Frühjahr, Herbst und Winter verbringen die europäischen Populationen in Mittel- und Südafrika, wahrscheinlich die ganze Zeit fliegend.

Etwa vierzig Gramm wiegt ein erwachsener Mauersegler, bei einer Flügelspannweite von 40 bis 45 Zentimetern. Männchen und Weibchen sehen gleich aus. Sie tragen ein bräunlich dunkles Gefieder mit hellerer Kehle. Der spindelförmige Körper, der kurz gegabelte Schwanz und die sichelförmigen Flügel machen den Vogel zu einem hervorragenden Luftakrobaten. Hindernisse umfliegt er haarscharf. Mit Fluggeschwindigkeiten von bis zu zweihundert Stundenkilometern gehören Mauersegler zu den schnellsten Vögeln überhaupt.

Zum Schlafen Aufstieg in die Luft

Im Flügelbau und in der Flugmuskulatur spiegelt sich die Anpassung an ein Leben fast ausschließlich in der Luft. Verkürzte Arm- und verlängerte Hand- wie Fingerknochen erlauben einen energetisch günstigen Flügelschlag. Die Flugmuskulatur macht die Vögel außerdem zu guten Seglern. Dank dessen können sie in eine Ruhehaltung verfallen, in der sie nachts in ein paar tausend Meter Höhe schlafen. Den Gleitflug unterbrechen sie dann nur sporadisch.

In der Antike glaubte man noch, Mauersegler hätten keine Beine. Ihr lateinischer Name *Apus* leitet sich von der griechischen Bezeichnung »ohne Füße« her. Tatsächlich sind ihre Beine winzig kurz. An den Füßen tragen sie aber vier kräftige, nach vorn gerichtete Krallen. Damit können die Vögel klettern und sich an Mauern und senkrechten Wänden anklammern – was Jungvögel manchmal nachts tun, Altvögel aber fast nur, wenn sie einen Nistplatz suchen. Zum Laufen auf dem Boden oder zum Hüpfen von Ast zu Ast eignen sich die Stummelbeine jedoch nicht.

Falsch ist die Mär, Mauersegler könnten, einmal auf dem Boden gelandet, aus eigener Kraft nicht mehr starten. Das gilt zwar für Jungvögel, die zu früh, mit noch nicht voll ausgewachsenen Flügeln ihr Nest verlassen haben. Ansonsten vermag jedes gesunde, nicht verletzte Tier, das etwa gefangen wurde, sogar von einem glatten Untergrund aufzufliegen. Freiwillig wird der Vogel allerdings niemals den Boden aufsuchen.

Mauersegler leben stets im Schwarm, sommers wie winters während des Zugs. Das haben bisher alle Beobachtungen bezeugt. Die Schar kann aus einigen Dutzend, aber auch aus mehreren tausend Individuen bestehen. Das Gruppenleben bietet manchen Vorteil. Insbesondere kommt es der Jagdstrategie der Art entgegen: Insekten und kleine schwebende Spinnen in der Luft zu erhaschen.

Dank ihrer Anzahl spüren die Vögel Massenansammlungen der Kerbtiere leichter auf. Offenbar werden sie von Artgenossen angelockt, die eine lohnende Futterquelle gefunden haben. Riesenschwärme bilden sich allerdings nur an Orten mit hohem Insektenaufkommen. Besonders beliebt zur Nahrungssuche ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die Darstellung eines Mauerseglers (links) und eines Alpenseglers entstammt dem historischen Werk »Naumann, Naturgeschichte der Vögel Mitteleuropas«, das vor hundert Jahren in einer neu bearbeiteten Auflage erschien.

sind beispielsweise Stellen, an denen die Thermik Insekten in Mengen hochträgt. Auch schwärmende Ameisen, wie sie oft nach Regen auftreten, oder in Afrika Termiten auf dem Hochzeitsflug locken Mauersegler an. Dass rasch viele weitere von ihnen auftauchten, wenn einige Artgenossen auf einen Ameisenschwarm gestoßen waren, konnten wir in der Garrigue, der heideartigen Landschaft bei Nîmes, gut beobachten. Ähnlich finden die Vögel hohe, insektenreiche Luftschichten vor einer heranziehenden Gewitterfront.

Ein anderer Vorteil des Schwarmlebens – den man auch von anderen Vögeln kennt – ist der Schutz vor Raubvögeln. Diesen fällt das Beuteschlagen aus einem Schwarm heraus schwer, weil sie das Hin und Her so vieler potenzieller Opfer offensichtlich irritiert – zumal diese sich dann oft eng zusammenschließen und nicht selten sogar den Feind gemeinsam verjagen. So flink und behende wie sie fliegen, dürften Mauersegler ohnehin kaum zu fangen sein. Einige wenige erfolgreiche Jagdzüge haben wir dennoch beobachtet. So machten einmal zwei Silbermöwen gemeinsam Jagd auf einen Schwarm, wobei die eine Möwe über, die andere unter der Vogelschar flog. Plötzlich stieß die obere Möwe hinab, sodass mehrere Segler in Richtung untere Möwe auswichen. Diese konnte tatsächlich einen von ihnen ergreifen.

Frustrierende Jagd eines Sperbers

Wir wurden auch Zeuge, wie ein Sperber vier Tage lang über dem Kloster unserer Kolonie in Nîmes immer wieder versuchte, einen von den etwa 230 dort kreisenden Mauerseglern im Sturzflug zu erhaschen. Nur zweimal gelang ihm während all der Zeit ein Fang. Das machte zusammen ungefähr achtzig Gramm an Beute – Federn und alles Übrige mitgerechnet. Dann gab der Sperber diese Jagdstrategie dort völlig auf. Wie es scheint, wissen Mauersegler instinktiv, dass sie bei Gefahr einen dichten Schwarm bilden müssen. Erst wenn der Raubvogel sich davonmacht, fliegen sie wieder lockerer.

Gefahr durch Raubfeinde droht ihnen allerdings manchmal, wenn sie verletzt sind und auf den Boden gehen müssen. Doch auch in ihrer Nisthöhle sind sie nicht immer sicher, denn manchmal finden Ratten oder Marder im Dachboden einen Zugang zum Nest.

Selbst auf dem weiten Flug ins Winter- beziehungsweise Sommerquartier bietet der Schwarm Schutz. Zudem finden die Vögel, wie sich nachweisen ließ, gemeinsam leichter ihren Weg. Allerdings wissen wir über das Zugverhalten der Mauersegler noch wenig. Sie sind zu klein, um sie mit Sendern versehen und sie so auf der weiten Strecke einzeln verfolgen zu können.

Im Frühjahr tauchen die ersten Mauersegler im März in Südspanien auf. Im April erreicht der Durchzug dort seinen Höhepunkt. Die letzten Gruppen treffen Anfang Mai in Spanien ein. Im Überwinterungsgebiet waren die Geschlechter getrennte Wege gegangen. Offenbar geschieht das auch auf dem Zug. Wie es aussieht, gliedern sich die ziehenden Schwärme im Wesentlichen in drei Kohorten: Zunächst kommen Gruppen von erwachsenen, bruterfahrenen Männchen, dann ebensolche Weibchen – wobei auch einige jüngere Vögel darunter sein können – und schließlich die unerfahrenen jungen Vögel.

Ihre Brutgebiete erreichen Mauersegler umso später, je höher diese im Norden liegen. In Deutschland tauchen die Ersten von ihnen Ende April/Anfang Mai in den angestammten Kolonien auf, in Finnland erst einige Wochen später, sobald es dort genügend Insekten gibt. Nach etwa drei Monaten, in Mitteleuropa Ende Juli bis Anfang August, verschwinden die Vögel normalerweise wieder und ziehen gen Süden.

Die erwachsenen, bruterfahrenen Männchen, die als Erste nach Europa zurückkommen, suchen ihre alte Kolonie auf und besetzen dort unverzüglich möglichst ihre Nisthöhle vom Vorjahr. Dorthin zieht es auch dasselbe Weibchen wieder, das in der Regel etwas später eintrifft. So kommt es, dass die Vögel jedes Jahr mit demselben Partner brüten. Stirbt allerdings einer davon, gewinnen sie sofort einen neuen Nistgefährten.


MUSÉUM DE NÎMES / PAUL-LOUIS ANDRÉ


JEAN PHILIPPE PARIS, VILLEPREUX

Mit ihren nach vorn gerichteten kräftigen Krallen können sich Mauersegler an rauen Wänden anklammern. Laufen können sie auf den kurzen Beinen nicht.





LINKS: MUSÉUM DE NÎMES / PAUL-LOUIS ANDRÉ ; RECHTS: PHILIPPE HENRI, CHAUMONT-SUR-LOIRE

Mauersegler sind Höhlenbrüter. Ihre zwei bis drei Eier bebrüten beide Eltern abwechselnd etwa drei Wochen lang. Die Jungen schlüpfen blind und nackt. Mit drei Wochen sind sie zunächst schwerer als die Altvögel. Mit etwa vierzig Tagen (rechtes Bild) fliegen sie aus – für immer. In dem Alter erkennt man Jungvögel an ihrer auffälligeren Federzeichnung.

Einjährige Vögel, sofern sie im ersten Sommer überhaupt nach Europa zurückkehren, sind noch nicht geschlechtsreif und machen keine Anstalten, sich zu verpaaren. Die zweijährigen, nun paarungsfähig, müssen erst einen Nistplatz und einen Partner suchen, was keine leichte Aufgabe ist. Sie fliegen eine Reihe von Kolonien an, bis es ihnen gelingt, sich irgendwo in den Schwarm von Altvögeln zu integrieren, der stets über dem Nistgebiet kreist. Dann erst besteht eine Chance, dass der Neuankömmling eine freie Höhle findet – oder vielleicht sogar einen freien Geschlechtspartner, der schon eine Bruthöhle besitzt.

Schutz in der Gemeinschaft

Das stete Herumflitzen über der Brutkolonie, das von schrillen Rufen begleitet ist, gehört zum Erscheinungsbild einer Mauerseglerkolonie. Hieran dürften neue Vögel potenziell geeignete Brutstätten erkennen. Vielleicht schützen die Altvögel die Koloniemitglieder auch vor unerwünschten erwachsenen Männchen, die sich als Fremdgänger unter den Schwarm mischen und etwa versuchen würden, sich mit einem der ansässigen Weibchen zu paaren. Man kann beobachten, dass mehrere der Koloniemitglieder einen Fremdling attackieren und ihn verfolgen. Manchmal krallen sich sogar zwei oder drei von ihnen in seinen Rücken, und oft schaffen sie es, ihn zu vertreiben.

Bezieht ein Brutpaar seine Höhle, wird es darin zunächst ein Nest anlegen oder das alte aufbessern. Die Vögel sammeln aus der Luft Blätter, Halme und anderes feines Pflanzenmaterial ein, auch herumfliegende Federn oder Papierfetzchen. Dies alles versetzen sie mit klebrigem Speichel, der schnell härtet, und bauen damit auf dem Höhlenboden ein flaches Nest mit leicht erhöhtem Rand. Die Paarung erfolgt gelegentlich im Nest, oft aber im Flug. Seine ein bis vier – in unserer Kolonie meistens drei – Eier legt das Weibchen binnen vier Tagen, manchmal aber auch alle am selben Tag, mitunter sogar rasch nacheinander. Gehen die Eier zu Grunde, kann das Weibchen ein zweites Mal einzelne Eier oder ein ganzes Gelege produzieren.

Die Eltern wechseln sich auf dem Nest ab. Wer beim Brüten freihat, fliegt auf Futtersuche. Wenn die Jungen nach 19 bis 24 Tagen schlüpfen, wiegen sie etwa zweieinhalb Gramm, sind blind und noch völlig nackt. Sie können ihre Körperwärme zunächst nicht selbst aufrechterhalten. Während der ersten beiden Wochen müssen sie darum ununterbrochen von einem der Eltern gehudert werden. Normalerweise sind sie nach 39 bis 45 Tagen flügge. Bekommen die Jungen bei schlechtem Wetter wenig zu fressen, kann die Nestphase deutlich länger dauern.

Auch das Füttern teilen sich die beiden Altvögel. Sie versorgen die Jungen ausschließlich mit kleinen Insekten und dergleichen, die sie in der Luft erjagen. Unter Umständen legen sie dafür weite Strecken zurück. Die Eltern verfüttern ihre Beute lebend, aber mundgerecht in Speichelpaketen verklebt. Solche Futterkugeln wiegen etwa zwei Gramm. Während der ersten fünfzehn Tage zerteilt der Elternvogel das Bällchen noch und verteilt unter den Nestlingen kleine Portionen. Später wird dem Nachwuchs eine ganze Kugel auf einmal in den Rachen gestopft.

So ein Futterpäckchen enthält Hunderte, sogar bis über tausend kleine Kerbtiere. Wie oft die Eltern mit einem Nahrungsballen zurückkommen, hängt allerdings stark von der Witterung ab, so auch davon, wie weit sie bis zu einer ergiebigen Quelle fliegen müssen. Je nach Insektenvorkommen schaffen sie in unserer Kolonie an guten Tagen zusammen über vierzig Fütterungen, an schlechten zählten wir manchmal nur sieben. Auf die Insektenpopulationen nehmen Mauersegler somit einigen Einfluss.

Reserven der Nestlinge für Hungerzeiten

Unter optimalen Bedingungen erreichen die Nestlinge ihr Höchstgewicht rasch, in nicht einmal drei Wochen. Sie wiegen dann um die sechzig Gramm, etwa das Anderthalbfache eines Altvogels. Den Rest der Zeit, den sie im Nest verbringen, benötigt das Gefieder zum Wachstum. Erst ein paar Tage bevor sie flügge werden, verlieren die Jungen Gewicht und magern nun bis auf das ideale Fluggewicht von rund vierzig Gramm ab.

Bei schlechtem Wetter und Nahrungsknappheit können Mauersegler ih- ▷



MUSÉUM DE NÎMES / GÉRARD GORY



JEAN-FRANÇOIS CORNUET, CRÉTEIL

Das Jesuitenkloster in Nîmes beherbergt jeden Sommer unter seinen Dächern eine Mauerseglerkolonie. Dann beherrschen die Flugspiele der Vögel und ihre hohen Rufe die Szene.

▷ ren Stoffwechsel drosseln, die Körpertemperatur etwas absenken und so einige Tage ohne Futter auskommen. Die Anpassung ist bei Nestlingen noch ausgeprägter. Sie verfallen dann in einen Starrezustand. An die zehn Tage lang können größere Junge von ihren Energiereserven zehren. Bringen die Eltern dann wieder Futter, erholt sich der Nachwuchs bald und entwickelt sich normal weiter. Doch wenn die Nestlinge noch länger hungern müssen oder zu stark abmagern, vermag ihr Stoffwechsel sich anschließend offenbar nicht mehr zu normalisieren. Die schwächsten Jungen im Nest gehen dann ein.

Der Sturzflug in die Selbständigkeit

Erstaunen weckt immer wieder, wie ein junger Mauersegler flügge wird. Der Jungvogel lässt sich einfach von der Nisthöhle in die Luft fallen und fliegt los, als habe er nie etwas anderes getan. Von nun an ist er selbständig. Er kehrt nicht wieder ins Nest zurück und landet auch meist überhaupt nicht mehr, sondern integriert sich in den Schwarm der Kolonie. Oft geschieht der Jungfernflug abends, und die Jungen übernachten dann gleich im Flug. Gewöhnlich ziehen die eben flügge gewordenen Vögel sehr bald gen Süden. Die Eltern versorgen sie ohnehin spätestens, wenn sie die Nisthöhle verlassen haben, nicht mehr. Allerdings haben wir den Eindruck, dass sich Altvögel der Kolonie um Artgenossen, die gerade flügge sind, besonders kümmern. Sie scheinen ihnen manchmal Hilfestellung zu geben, vielleicht sogar eine Art Flugunterricht zu erteilen.

Anders als die Altvögel, die jeden Sommer am selben Ort immer mit demselben Partner brüten, kehren junge Vögel selten zu ihrer Aufzuchtkolonie zurück. Um das genauer zu ermitteln, haben wir in Nîmes einige hundert Jungvögel beringt. Nur eine Hand voll von ihnen ist hier wieder aufgetaucht. Allerdings muss man dabei auch bedenken, dass die Sterblichkeit im ersten Lebensjahr mit bis zu einem Drittel der Vögel hoch ist. Je nach Kolonie überleben zwischen 65 und 78 Prozent des Nachwuchses.

Seit Jahrhunderten hat sich der Mauersegler in unsere von Ortschaften durchsiedelte Kulturlandschaft einpassen können. Entwickelt hat sich dieser erstaunliche Flieger in Urwäldern mit alten, halb abgestorbenen Bäumen und zerklüfteten Felsen. Dort fand der gesellige Vogel genügend hoch gelegene Ritzen und Baumhöhlen zum Nisten für sein Gruppendasein. Noch immer siedeln hier und da Kolonien in natürlicher Umgebung. Doch die meisten der angestammten Plätze wichen in Mittel- und Westeuropa durchforsteten Wäldern oder freier Landschaft ohne Nistmöglichkeiten. Stattdessen eroberten Mauersegler Burgen, Kirchen und andere hohe Bauten. Man darf vermuten, dass ihre Anzahl dank der vielen neuen Brutgelegenheiten zunahm.

Alles an diesem Vogel ist auf das gesellige Leben in der Luft und in der Brutkolonie abgestimmt. Seine Ortstreue, die damit zusammenhängt, wird ihm heute zum Verhängnis. Immer mehr Kolonien lösen sich auf, weil Bruthöhlen durch die Sanierung alter Bausubstanz verloren gehen. Dabei ist es nicht besonders aufwändig, den Vögeln weiterhin Nistmöglichkeiten anzubieten. Bei etwas architektonischem Geschick kann man in die Fassaden leicht Nistplätze integrieren. Mit etwas mehr Einsatz gelingt es sogar, neue Kolonien zu gründen. Wer etwas tun möchte, sollte sich allerdings unbedingt an die Ratschläge der Naturschutzverbände halten. Gleiches gilt, wenn man Mauersegler hilflos am Boden findet. Sie sind schwer artgerecht zu versorgen.

Noch sind Mauersegler nicht bedroht, stehen aber unter Schutz – auf der Vorwarnliste, die voraussichtlich bald gefährdete Arten anführt. Doch nach einer neueren Studie für zwölf Länder Europas gehen die Bestände derzeit stark zurück, in manchen Orten Ostdeutschlands in den letzten Jahren um 50 Prozent. Noch gibt es in Deutschland schätzungsweise 450 000 bis 900 000 Paare. Außer den Einbußen an Brutmöglichkeiten bedroht diese reinen Insektenfresser der Pestizideinsatz in der Landwirtschaft. Was bringen alle renovierten Fassaden, wenn im Herzen unserer Städte keine Mauersegler mehr herumsausen und die Luft mit ihren gellenden Schreien erfüllen? ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Gérard Gory ist Direktor des Naturhistorischen Museums im südfranzösischen Nîmes. Dort leitet er die Forschungen über Mauersegler.

Faszinierende Forschung an einem »Hausvogel«. Von Erich Kaiser in: Der Falke, Heft 1, S. 10, 2003

Mauersegler in Menschenhand. Von der Deutschen Gesellschaft für Mauersegler e. V. (Hg.). 5. Aufl., Frankfurt am Main 2001

Zur Brutphänologie der Mauersegler *(Apus apus)* – Das täglich letzte Einfliegen in Beziehung zu Umwelt- und sozialen Faktoren. Von Ulrich Tigges. Berliner Ornithologischer Bericht, Berlin 1999

Mauersegler gezielt ansiedeln. Von Erich Kaiser und Andreas Schulte. Musikverlag Edition Ample (CD mit Vogelrufen zum Anlocken)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Tsunamis im Mittelmeer?

Die Mechanismen, welche die katastrophale Flutwelle im Indischen Ozean auslösten, können im Prinzip überall auf der Erde wirksam werden. Im Mittelmeer und in der Karibik sind die Erdbeben zwar weit schwächer; ihre Wirkung wird jedoch mitunter durch Hangrutsche verstärkt.

Von Pascal Bernard

Wodurch wurde das Erdbeben, das am 26. Dezember 2004 den Meeresboden des Indischen Ozeans erschütterte, zu der beispiellosen Naturkatastrophe, die mehr als 280 000 Menschen das Leben kostete und Küstenabschnitte von 3000 Kilometer Länge samt Hinterland völlig verwüstete?

Die aus seismischen Messungen erschlossene Stärke (Magnitude) des Erdbebens auf der Richterskala wird allgemein mit 9,0 angegeben. Nach neueren, noch nicht allgemein anerkannten Berechnungen, die auch die Energie schwer zu beobachtender seismischer Wellen einbeziehen, ist dieser Wert auf 9,3 zu korrigieren. Damit wäre es zwar das zweitschwerste Beben seit Menschengedenken – aber noch nicht einzigartig. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden zahlreiche heftige Beben registriert, von denen zwei dem aktuellen ebenbürtig waren: 1960 in Chile mit 9,5 und 1964 in Alaska mit 9,2.

Beide Male rissen unter der Erdoberfläche Bruchlinien von mehr als 1000 Kilometer Länge auf. Beide Beben forderten Tausende von Todesopfern; aber die Menschen wurden nicht in erster Linie durch zusammenstürzende Häuser oder Brücken erschlagen, sondern ertranken in den durch das Beben ausgelösten Flutwellen.

Für diese Wellen hat sich der japanische Name Tsunami (»Hafenwelle«) eingebürgert. Im Gegensatz zu den gewöhnlichen, durch Wind erzeugten Meereswellen bewegt sich nicht nur eine oberflächennahe Wasserschicht, sondern die gesamte Wassersäule bis hinunter zum Meeresboden. Die Welle ist auf hoher See so klein, dass man sie ohne Weiteres übersehen kann; erst in Küstennähe steilt sie sich zu zerstörerischer Höhe auf. Anekdoten berichten von Fischern, die vom Meer zurückkehrten und den Heimathafen durch einen Tsunami zerstört fanden, von dem sie draußen nichts bemerkt hatten. Nach dem Erdbeben von Chile im Jahr 1960 erreichten Tsunamis Hawaii und sogar Japan, wo Hunderte von Toten zu verzeichnen waren (Spektrum der Wissenschaft 7/1999, S. 40).

Sehr starke Erdbeben mit nachfolgendem Tsunami finden nicht nur am anderen Ende der Welt statt, sondern sind sogar relativ gewöhnliche Ereignisse. Diese Nachricht ist nicht gerade beruhigend. Können sie zum Beispiel auch in Europa vorkommen?

Um Aussagen darüber machen zu können, bietet sich das Studium historischer Erdbeben an. Deren Ort, Zeit und Stärke bieten Anhaltspunkte dafür, wann die seit dem letzten Erdbeben dort aufgebauten Spannungen sich in einer neuen Katastrophe entladen werden. Dieser Artikel fasst die wesentlichen Mechanis-

Hier bricht die Flutwelle vom 26. Dezember 2004 über eine Hotelanlage in Penang (Malaysia) herein. Das Bild entstammt einem Amateurvideofilm.

men der Erdbebenentstehung kurz zusammen, beschreibt die Katastrophe vom 26. Dezember und untersucht dann zwei Regionen genauer: die Karibik und das Mittelmeer.

Ursache: ein weit ausgedehnter Bruch

Die wahrscheinlichsten Entstehungsorte für große Tsunamis liegen in den Subduktionszonen, dort, wo eine Lithosphärenplatte des Erdmantels unter eine andere taucht. Diese Regionen sind seismisch sehr aktiv, liegen größtenteils unter Wasser, und ein Seebeben mit einer Stärke über 8 kann den Meeresboden um mehr als einen Meter heben oder absenken. Zudem sind in den unterseeischen Subduktionszonen die Grenzen der Platten sehr glatt und regelmäßig geformt. Dadurch kann ein Bruch in einer Verwerfungszone sich relativ leicht über mehrere hundert Kilometer hinweg ausbreiten, ohne von einer Störung aufgehalten zu werden.

Das Beben vom 26. Dezember 2004 ereignete sich im nördlichen Teil der indonesischen Subduktionszone. An dieser Stelle taucht die im Westen befindliche Indische Platte unter ein Anhängsel der Eurasischen Platte ab, die kleine Burma-Platte, und zwar in nordöstlicher Richtung – nach neuesten Untersuchungen mit einer Geschwindigkeit von knapp sechs Zentimetern pro Jahr.

Die Grenze zwischen beiden Platten ist, grob gesprochen, eine schiefe Ebene, die in einem Winkel von etwa 15 Grad nach Nordosten hin in die Tiefe ragt. Entlang dieser gigantischen Rampe gleiten die Platten in der Tiefe sehr langsam und gleichmäßig aneinander entlang, da das Material dort heiß und relativ leicht verformbar ist. Die harte Erdkruste kann jedoch wegen der Rauigkeit der Gesteinsblöcke diese Bewegung nicht mitvollziehen. In ihr baut sich daher im Lauf der Jahrhunderte ein zunehmender Druck auf, wie bei einer Uhrfeder, die immer weiter aufgezogen wird. Wenn dieser Druck einen kritischen Wert erreicht, überwinden die aufgebauten Kräfte die durch die Rauigkeit verursachte Haftreibung, die Gesteine brechen und rutschen sehr schnell – Größenordnung ein Meter pro Sekunde – aneinander vorbei. Dabei lösen sich, wie wenn die Uhrfeder bricht, urplötzlich die in Jahrhunderten aufgebauten Spannungen und die Gesteine ringsum werden versetzt. Die heftige Er- ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▷ schütterung pflanzt sich in Form von Erdbebenwellen fort und versetzt auch das unter Spannung stehende Nachbargestein in Bewegung.

Der seismische Bruch vom 26. Dezember ereignete sich nicht auf einen Schlag. Vielmehr wurde die Verwerfung zunächst in einem kleinen Bereich an ihrem südlichen Ende entriegelt, 150 Kilometer westlich der Insel Sumatra, in einer Tiefe von etwa 30 Kilometern; andere Einschätzungen der Tiefe liegen bei 10 Kilometern unter dem Meeresboden. Der Bruch breitete sich dann mit ungefähr 2,5 Kilometer pro Sekunde aus, im Wesentlichen nach Norden, und erfasste dabei fortschreitend die gesamte Oberfläche der Verwerfung. Nach vier Minuten und 500 Kilometern kam der Bruch nahe der Inselgruppe der Nikobaren zunächst zum Stillstand, dehnte sich dann aber unter zahlreichen Nachbeben auf insgesamt mehr als 1000 Kilometer Länge aus (Bild rechts).

Die Gesteine, die durch den Bruch plötzlich Bewegungsfreiheit gewannen, rutschten ungefähr zehn Sekunden lang, bis sie zum Stillstand kamen und sich wieder ineinander verhakten, weil die Spannungen sich abgebaut hatten. Im Ergebnis schob sich die Burma-Platte um etwa zehn Meter nach Südwesten über die Indische Platte, wobei sie um mehrere Meter angehoben wurde.

Die schnellsten seismischen Wellen wanderten mit sechs Kilometer pro Sekunde durch die Kruste. Nach kaum einer halben Minute, während sich der Bruch noch fortpflanzte, erreichten sie die nur 100 Kilometer entfernte Küste Sumatras und richteten dort wegen der geringen Entfernung noch Schäden an. Als die erste heftige Gesteinsbewegung zum Stillstand kam, hatten sie im Osten bereits Thailand erreicht und zwei Minuten später Sri Lanka im Westen. Die dort hervorgerufenen Erschütterungen waren für die Menschen nicht mehr spürbar, wohl aber allem Anschein nach für die Tiere, von denen viele lange vor Ankunft der Flutwelle von der Küste ins Hinterland flüchteten.

Nach dem Ende der heftigen Gesteinsbewegung hatte der Meeresboden eine deutlich andere Gestalt angenommen: Im Westen hob die aufgestiegene Platte die Wassermassen über sich in einer Breite von mehreren hundert Kilometern um zwei oder drei Meter an. Da sie in sich relativ starr ist, wurde sie nicht nach oben verbogen, sondern eher gekippt, mit der Folge, dass im Osten der Meeresboden und mit ihm der Meeresspiegel ein Stück absank.

Mit über 500 Stundenkilometern

Kaum entstanden, begannen der sehr breite und flache Wellenberg im Westen zu zerfließen und das Tal im Osten sich aufzufüllen. Diese relativ geringfügige Bewegung erfasste sehr große Wassermassen, und deren Impuls pflanzte sich mit hoher Geschwindigkeit in alle Richtungen fort: Das war der Tsunami.

Die Physiker sprechen von einer Schwerewelle, weil die Rückstellkraft der Wasserschwingung die Schwerkraft ist. Zugleich wird sie als Flachwasserwelle eingestuft, nicht weil der Indische Ozean besonders flach wäre, sondern weil die Wassertiefe von etwa fünf Kilometern klein ist gegenüber der Wellenlänge von einigen hundert Kilometern. Für die Geschwindigkeit v einer Flachwasserwelle gilt die Gleichung $v^2 = g \cdot h$ (g Erdbeschleunigung, h Wassertiefe), und zwar unabhängig von der Wellenlänge. Anders als die kurzen Wellen an der Oberfläche eines Gewässers, deren Geschwindigkeit von der Wellenlänge abhängt, unterliegt sie also nicht der Dispersion, das heißt, sie zerfließt nicht, sondern ihre Energie bleibt auf kleinem Raum konzentriert.

Der Tsunami vom 26. Dezember raste als kaum wahrnehmbare Erhebung des Wasserspiegels mit weit über 500 Stundenkilometern über den Ozean. Im flachen Wasser vor der Küste nahm seine Geschwindigkeit auf etwa 30 Stundenkilometer ab. Dabei verwandelte sich kinetische Energie in potenzielle, das heißt, die Welle steilte sich auf eine Höhe von 30 Metern auf.

Einige Inseln westlich und nördlich von Sumatra sowie die Nordspitze Sumatras selbst liegen auf der Burma-Platte und wurden gleichzeitig mit dem Ozean angehoben. Der Meeresspiegel sank daher zunächst relativ zur Küste ab, sodass die auf die Küste zulaufende Welle mit einem Wellental begann. Andere, weiter östlich gelegene Inseln sanken mitsamt ihrer Platte geringfügig ab; entsprechend muss dort der Meeresspiegel zunächst angestiegen sein. Die zerstörerischen Wellen liefen mit einer Periode von einigen Dutzend Minuten ein. Dies entspricht der Zeit, innerhalb derer die Schwerewellen die gestörte Zone durchwanderten.

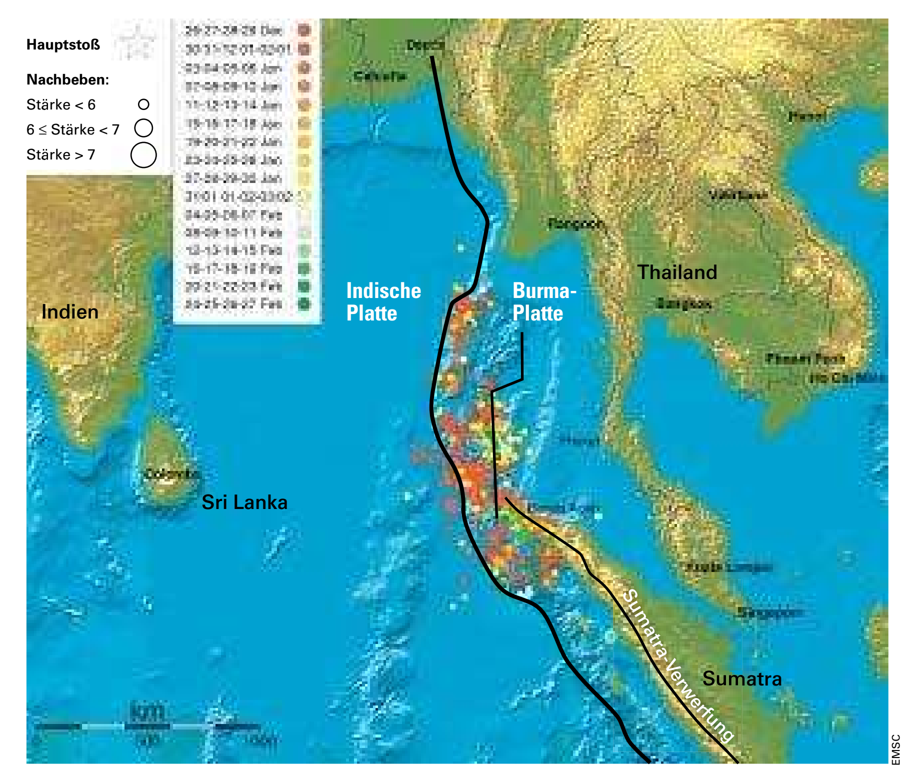
Sie trafen die Küsten Sumatras nach etwa 10 Minuten. Thailand, 500 Kilometer entfernt, wurde nach zwei Stunden erreicht, ebenso wie Sri Lanka, obwohl dieses 1500 Kilometer entfernt liegt. Doch die Ausbreitung erfolgte nach Westen wegen der größeren Wassertiefe viel schneller. Ob an den fernen Küsten zuerst ein Wellental oder ein Wellenberg eintraf, hängt nicht nur von deren Anordnung am Ort der Entstehung ab. Durch die variierende Meerestiefe wurde die Welle auf komplizierte Weise beeinflusst. Im Allgemeinen nahm mit zunehmender Laufstrecke die Anzahl der Wellenberge zu, wobei der erste nicht immer der größte war. Einige Wellen kamen durch Reflexion und Brechung am Relief des Meeresbodens auf Umwegen und dadurch entsprechend später ans Ziel.

An einem unterseeischen Steilhang wäre eine Welle teilweise reflektiert worden und hätte ihre Energie wieder ins offene Meer transportiert. Aber die sanft ansteigenden Hänge des Meeresbodens lenkten keinen nennenswerten Anteil der Energie vom Land ab. In Buchten wurde durch einen Trichtereffekt die Aufsteilung durch abnehmende Wassertiefe noch erheblich verstärkt. So kam es zu den katastrophalen Überflutungen.

Kann sich im Indischen Ozean eine derartige Katastrophe in naher Zukunft wiederholen? Zwei Risiken müssen im Einzelnen untersucht werden: ein weiteres starkes Erdbeben an einer Verwerfung an Land sowie ein zweiter tödlicher Tsunami, verursacht durch ein erneutes Seebeben.

IN KÜRZE

- **Ursache der verheerenden Flutkatastrophe** vom 26. Dezember 2004 war die plötzliche Anhebung des Meeresbodens auf großer Fläche um mehrere Meter infolge eines unterseeischen Erdbebens.
- Die **Flutwelle (»Tsunami«)** erreicht in der Tiefsee die Geschwindigkeit eines Flugzeugs; ihre Energie bleibt auf engem Raum konzentriert.
- Außer Erdbeben können auch **Vulkanausbrüche, unterirdische Hangrutsche oder Meteoriteneinschläge** Tsunamis auslösen.



In dieser Verwerfungszone, wo die Indische Platte und die Burma-Platte um knapp sechs Zentimeter pro Jahr aufeinander zu wandern, hat der erste Bruch 150 Kilometer westlich von Sumatra stattgefunden. Die Kreise bezeichnen Nachbeben, nach Größe und Datum unterschiedlich dargestellt. Die Karte stammt vom Europäisch-Mediterranen Seismologischen Zentrum (EMSC).

Die dem Bruch von 2004 am nächsten gelegene, aktive Verwerfung an Land ist diejenige von Sumatra, welche die Insel in ihrer gesamten Länge zerteilt. In ihrem Nordteil wurde sie infolge des jüngsten Bebens entlastet, weshalb sie nun leichter ins Rutschen kommen könnte. Jedoch kam es dort bis heute zu keiner nennenswerten Erdbewegung, was für ihre aktuelle Stabilität spricht. Diese Einschätzung ist jedoch vorläufig und sollte durch genauere seismische und geodätische Messungen bestätigt – oder auch entkräftet – werden. Bleiben wir vorsichtig: Starke Beben ereignen sich häufig ohne Vorwarnung in Form merklicher Erdbewegung (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. 44).

Könnte ein zweites Subduktionsbeben mit einer Stärke von mehr als 8 schon bald fällig sein? Südlich der aktuellen Bruchzone, 100 Kilometer von Sumatra entfernt, war das letzte starke Beben das von 1861 mit einer Stärke von etwa 8,5. Damals haben sich die beiden Platten um schätzungsweise sechs Meter aufeinander zu bewegt.

Demnach hat der tektonische Druck die Plattengrenze um diese sechs Meter komprimiert, bevor die Gesteine ihm nicht mehr standhalten konnten. Unterstellen wir, dass ein Erdbeben diesen Druck vollständig abbaut. Bei einer Konvergenzgeschwindigkeit von sechs Zentimeter pro Jahr dauert es hundert Jahre, bis der Druck wieder bis zur Belastungsgrenze angewachsen ist. Beide Zahlen, der Rutschweg wie die Plattengeschwindigkeit, sind allerdings sehr unsicher. Da bei dem aktuellen Beben die 1861 aufgebrochene Verwerfung nicht wieder aufgerissen ist und auch Nachbeben in dieser südlicheren Region ausblieben, liegt der Schluss nahe, dass dieses Subduktionssegment noch weit von seiner Belastungsgrenze entfernt ist.

Knapp an der Belastungsgrenze

Nördlich der verworfenen Zone, zur Inselgruppe der Andamanen hin, lag das letzte starke Beben im Jahr 1888. Es wurde von einer mörderischen Flutwelle begleitet, und seine Stärke wird auf 8 geschätzt. Zahlreiche Nachbeben, von denen einige die Stärke 7 überschritten, waren auf der gesamten Oberfläche der Verwerfung zu beobachten. Wenn diese nicht schon aufgebrochen ist (die Frage ist noch offen), könnte der 300 bis 500 Kilometer lange Nordabschnitt innerhalb der nächsten Jahre aufbrechen und damit ein Erdbeben der Stärke 8 oder mehr verursachen. Diese Möglichkeit rechtfertigt große und aufwändige Projekte, um die vergangene und gegenwärtige tektonische Aktivität dieser Region besser zu erforschen.

An welchen anderen Stellen der Erde besteht Gefahr für die nähere Zukunft? Zahlreiche Parameter sind bei der Beantwortung dieser Frage zu berücksichtigen, darunter die Geschwindigkeit der Plattenbewegung, die Dichte der abtauchenden Platte (die wiederum von deren Alter abhängt) und der Zeitpunkt des letzten starken Bebens (vergleiche Spektrum der Wissenschaft 10/1996, S. 64). Denn je länger dieses Beben her ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass sich in der Zwischenzeit eine Spannung aufgebaut hat, die demnächst zum Bruch führen wird. Wie aber soll man das Risiko einschätzen, wenn in einem tektonisch aktiven Gebiet seit Menschengedenken kein Erdbeben zu verzeichnen war? Vielleicht haben die Platten relativ glatte Oberflächen, sodass sie kontinuierlich, ohne sich zu verklemmen, aneinander entlang gleiten und eine Spannung, die sich in einem Erdbeben entladen würde, gar nicht erst entsteht. Oder aber die Platten haben sich verkeilt, und seit dem letzten Erdbeben ist die Spannung bis knapp unter die Belastungsgrenze angewachsen: Dann hätte man allen Anlass zur Furcht.

Auch dort, wo wegen hoher Konvergenzgeschwindigkeit die Erdbeben in relativ rascher Folge auftreten und daher gut dokumentiert sind, bleibt über den Zeitpunkt des nächsten Bebens eine große Unsicherheit bestehen. So hat man für den Süden von Peru und den Norden von Chile, wo sich die letzten starken Beben mit Stärken um 8,5 im Jahr 1868 beziehungsweise 1877 ereigneten, die Periodendauer, das heißt den Zeitraum zwischen zwei Beben, mit ungefähr einem Jahrhundert eingeschätzt. Die Platten wandern hier mit einer Geschwindigkeit von etwa acht Zentimeter pro Jahr aufeinander zu. Im Süden von Peru fand 2001 tatsächlich ein Beben der Stärke 8,4 statt, zum Glück ohne nennenswerten Tsunami. Dem Norden von Chile stehen demnach noch ein Bruch und eine zerstörerische Flutwelle bevor, wie 1877, als die seismische Welle eine Höhe von 24 ▷

▷ Metern erreichte. Wird dies morgen oder erst in einigen Jahrzehnten der Fall sein?

Im Nordatlantik liegt die einzige Subduktionszone bei den Antillen, im Osten der Karibik. Das größte Beben der letzten drei Jahrhunderte war dasjenige von 1843, das Guadeloupe und seine nördliche Nachbarinsel Antigua verwüstete. Ohne Zweifel handelte es sich um ein Subduktionsbeben an der Grenze zwischen der Karibischen und der Atlantischen Platte. Seine geschätzte Stärke lag zwischen 7,5 und 8. Wahrscheinlich brach das Gestein auf einer Länge von 100 bis 200 Kilometern auf, und die Bruchkanten rutschten ungefähr fünf Meter übereinander.

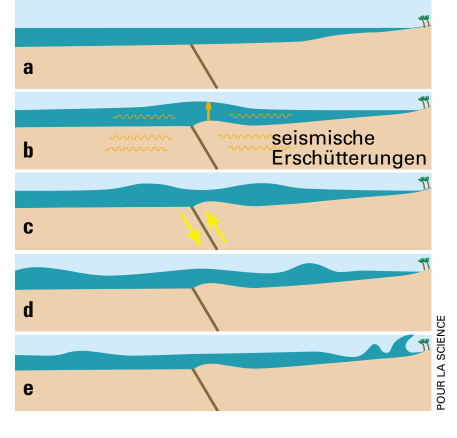
Der auf der Insel Antigua beobachtete Tsunami war nicht höher als ein Meter, vielleicht weil der Bebenherd so tief lag, dass darüberliegende Gesteinsschichten die Wirkung des Bruchs dämpften und die Hebung oder Senkung des Meeresbodens entsprechend geringer ausfiel. Das ist nicht unbedingt ein Anlass zur Beruhigung, denn ein künftiges Subduktionsbeben könnte stärker sein und sein Herd dichter unter der Oberfläche liegen.

Die Seismologen, die für die amtliche französische Erdbebenvorhersage das Risiko untersuchen – einige Antilleninseln gehören zu Frankreich –, schätzen ein Beben mit einer Stärke über 8 im Bereich der Kleinen Antillen als unwahrscheinlich ein, da die Konvergenzgeschwindigkeit mit zwei Zentimeter pro Jahr gering ist. Aber vor der Katastrophe von 2004 hätten auch nur wenige Seismologen ein Seebeben der Stärke 9 nördlich von Sumatra in Betracht gezogen.

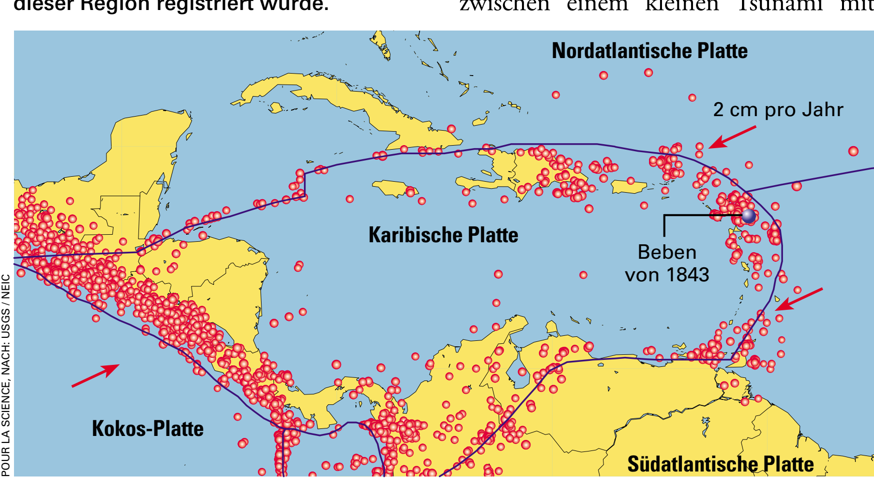
Würde man die Stärke des größten anzunehmenden Erdbebens bei den Antillen auf 8,5 statt auf 8 ansetzen, was wären die potenziellen Konsequenzen? Man beachte: Die Richterskala ist ein logarithmischer Maßstab. Ein Punkt mehr auf der Skala bedeutet die 32-fache Energiefreisetzung, und ein halber Punkt immerhin die 5,7-fache.

Die unmittelbaren Folgen eines solchen stärkeren Erdbebens würden nicht wesentlich schlimmer ausfallen. So würde die Wahrscheinlichkeit, dass innerhalb der nächsten fünfzig Jahre die Beschleunigung des Bodens die Schwelle zu Zerstörungen (2 Meter pro Sekundenquadrat) überschreitet, sich nicht merklich erhöhen. Dagegen macht der halbe Punkt auf der Skala den Unterschied aus zwischen einem kleinen Tsunami mit Wellenhöhen von einem bis zu zwei Metern und einem mit der doppelten Amplitude, der sich beim Auflaufen auf die Küste zu mörderischen Höhen aufsteilt.

Um die Wahrscheinlichkeit zukünftiger Tsunamis im Archipel von Guadeloupe abzuschätzen, untersuchen die Forscher die Spuren vergangener Verursacher, nämlich sehr heftiger Beben an Plattengrenzen. Mehrere Fachrichtungen sind daran beteiligt: Geodäten, Seismologen und Geologen. Vor zwei Jahren wurde auf Guadeloupe ein Netz von Messpunkten zur GPS-Positionsbestimmung installiert. Es arbeitet mit einer Genauigkeit von 5 Millimetern und soll die Stauchung der Insel in Ost-West-Richtung messen. Wie erwähnt, driften die Karibische und die Atlantische Platte aufeinander zu, sodass die Insel in dieser Richtung zusammengedrückt wird. Die GPS-Messungen lassen genauer die Größe und Lage der blockierten Zone erkennen, die beim nächsten Beben aufbrechen kann. Da die Insel zwischen Basse-Terre im Westen und La Désirade im Osten nur einige Millimeter pro Jahr schrumpft, werden erste verlässliche Ergebnisse erst in fünf bis zehn Jahren erwartet.



Im Moment des Bebens bricht die Verwerfung auf und setzt seismische Erschütterungen frei, die sich an Land und im Meer ausbreiten. Über dem Verwerfungsbruch entsteht ein Wellenberg (b), gefolgt von einem Wellental, und zwei Wellenberge pflanzen sich in beide Richtungen fort (c). Mit abnehmender Wassertiefe steilt sich der Wellenberg auf (d und e).

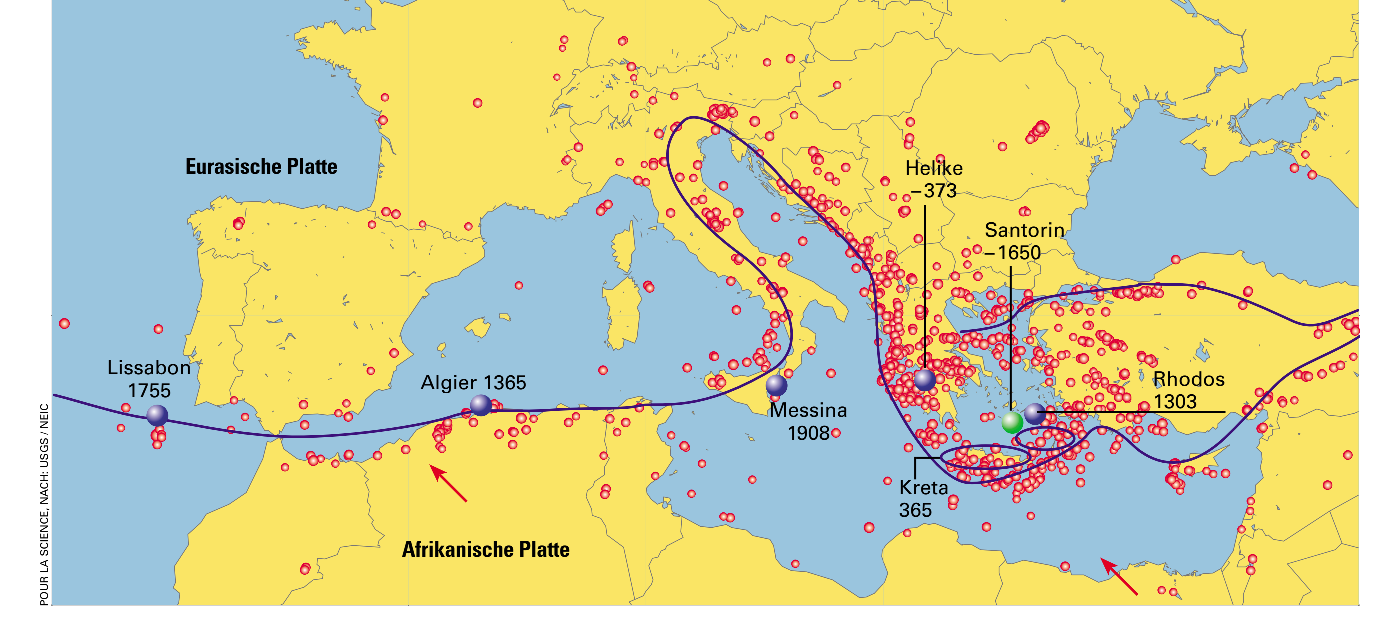


Die Erdbeben in der Karibik konzentrieren sich auf die Grenzen zwischen der Kokos-Platte, der Karibischen, der Nordatlantischen und der Südatlantischen Platte. Das Beben von 1843 war das stärkste, das in den letzten 300 Jahren in dieser Region registriert wurde.

Korallen als Indikator

Außerdem löst man von Schiffen aus kleine Explosionen aus, deren Schwingungen die Erdkruste durchlaufen und deren Echos man dann aufzeichnet. Dadurch lässt sich die Kontaktfläche zwischen den Platten in der Tiefe genau lokalisieren; vielleicht ist aus den Echos sogar zu erschließen, ob die Platten verhakt oder entriegelt sind. Unterwasser-Seismografen östlich der Inseln, in der Nähe der Verwerfung, zeichnen die schwachen, mehr oder weniger regelmäßig auftretenden Beben an der Plattengrenze auf und helfen dadurch diese genauer zu lokalisieren. Schließlich versucht man durch die Untersuchung der Korallen vor den Inselküsten nähere Aufschlüsse zu gewinnen. Korallen wachsen bevorzugt in geringen Tiefen und sterben ab, wenn sie nicht mehr mit Wasser bedeckt sind. Also kann man aus ihrer Untersuchung die Hebungen und Senkungen der Küsten erschließen und daraus deren Auslöser, nämlich den Anstieg der Spannung in den Platten zwischen zwei Erdbeben und den Bruch zwischen den Platten im Moment des Bebens.

Der Mittelmeerraum steht den Antillen in nichts nach: Im Süden Griechen-



Der Mittelmeerraum ist durch die Konvergenz der Afrikanischen und der Eurasischen Platte starken Spannungen unterworfen. Die Kreise kennzeichnen die wichtigsten Beben der Vergangenheit. Die größten von ihnen mit einer geschätzten Stärke von mehr als 8 waren diejenigen von Helike (373 v. Chr.), Kreta (365 n. Chr.) und Rhodos (1303). Sie haben verheerende Tsunamis ausgelöst.

lands wandert die Afrikanische Platte um drei Zentimeter pro Jahr nach Norden und taucht unter das Ägäische Meer ab, das zur Anatolischen Platte gehört. Diese verschiebt sich auf der Höhe von Kreta um einen Zentimeter pro Jahr nach Süden. Daraus resultiert eine Plattenkonvergenz von annähernd vier Zentimetern pro Jahr, was eine starke seismische Aktivität entlang der Plattengrenze und in der abtauchenden Platte bis in eine Tiefe von 100 Kilometern mit sich bringt. An der Oberfläche entspricht die Plattengrenze einem Bogen, der von den Ionischen Inseln westlich von Griechenland nach Süden entlang dem Peleponnes, dann nach Osten bis zur Südküste von Kreta und schließlich nach Nordosten in Richtung Rhodos und türkische Küste verläuft (Bild oben). Alle genannten Küstenregionen gehören zur Anatolischen Platte und werden langfristig mit ihr angehoben.

Überliefert sind mindestens zwei sehr starke Beben an dieser Subduktionszone, denen auch zerstörerische Tsunamis folgten: eines im Jahre 365, das andere 1303. Das erste verursachte starke Zerstörungen insbesondere auf ganz Kreta; sein Tsunami verwüstete den Küstenstreifen der gesamten Region bis nach Ägypten und sogar das östliche Sizilien. Nach den überlieferten Quellen kamen in Alexandria 50 000 Menschen ums Leben. Die Stärke des Bebens lag ohne Zweifel zwischen 8 und 8,5. Das Beben von 1303 mit der geschätzten Stärke 8 zerstörte die Insel Rhodos und den östlichen Teil Kretas. Es verursachte einen Tsunami, der ebenfalls die ägyptische Küste erreichte.

Die griechische Subduktionszone ist immer noch aktiv, auch wenn größere Ereignisse selten auftreten. Bei der gegenwärtigen Konvergenzgeschwindigkeit ist in den nächsten hundert Jahren mit Beben der Stärke 8 oder mehr sowie mit zerstörerischen Tsunamis zu rechnen.

Nicht nur bei Subduktionsbeben entstehen große Tsunamis. Die Konvergenz der Afrikanischen und der Eurasischen Platte hat im westlichen Teil so genannte Deckenüberschiebungen oder inverse Verwerfungen zur Folge. Dabei schiebt sich die obere Platte über die untere, ohne dass diese in den Erdmantel abtaucht (Bild S. 40, b). Außerdem sind die Verwerfungen auf die oberen zehn bis zwanzig Kilometer der Erdkruste beschränkt und an der Oberfläche stark segmentiert, das heißt, durchgehende Abschnitte der Grenze sind allenfalls einige Dutzend Kilometer lang und von quer liegenden Störungen flankiert, an denen ein sich fortpflanzender Bruch in der Regel zum Stillstand kommt. Erdbeben, die mehrere Segmente auf einmal über mehr als 50 Kilometer hinweg zum Aufbrechen bringen, sind selten. Sie entsprechen dann einer Stärke von 7.

Tsunami von Lissabon

Ein guter Teil dieses Verwerfungssystems liegt im Meer: im Atlantik südlich von Portugal und westlich von Marokko sowie im Mittelmeer vor der Nordküste Marokkos und Algeriens. Das Erdbeben von Lissabon 1755 ging von einer derartigen Verwerfung aus. Sein Tsunami erreichte die portugiesische, spanische und marokkanische Küste und überschwemmte den Fluss Tejo mit zwanzig Meter hohen Wellen, welche die tiefer gelegenen Teile der portugiesischen Hauptstadt unter Wasser setzten. Der Tsunami war bis zu den Antillen beobachtbar. Durch die Analyse seiner Spuren haben die Geophysiker den Bebenherd etwa 100 Kilometer südwestlich von Lissabon ausgemacht, doch seine genaue Lokalisierung bleibt ungewiss. In dieser Region existieren noch weitere unterseeische Verwerfungen mit vergleichbarem zerstörerischem Potenzial.

Im Mittelmeer hat das Beben bei Boumerdes in Algerien am 21. Mai 2003, das eine Stärke von 6,7 erreichte und fast 2000 Todesopfer forderte, ebenfalls einen Tsunami verursacht. Die Plattengrenze verläuft hier an der Oberfläche 50 Kilometer lang parallel zur Küste und dringt nach Süden ins Erdinnere ein. Durch das Erdbeben schoss die algerische Küste mitsamt dem angrenzenden Meeresboden um ungefähr einen halben Meter nach oben. Der dadurch ausgelöste Tsunami forderte keine Opfer, erreichte aber mit Wellen von ein bis drei Meter Höhe die 250 Kilometer weiter nördlich gelegenen Balearen und zerstörte in den dortigen Häfen Hunderte kleiner Boote.

Wenn westlich oder östlich dieser Stelle ein geringfügig stärkeres Beben stattfinden sollte – Stärke 7 bis 7,5 –, würde es einen mörderischen Tsunami auslösen, der einen etwa 50 Kilometer langen Abschnitt der algerischen Küste und wahrscheinlich auch die Balearen treffen würde. Es wäre nicht der erste: In historischer Zeit wurde die Region um Algier von weiteren Erdbeben mit gro- ▷

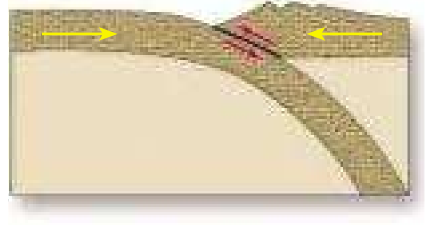
ßen Tsunamis heimgesucht; so wurden im Jahr 1365 die tiefer gelegenen Stadtteile von Algier überflutet.

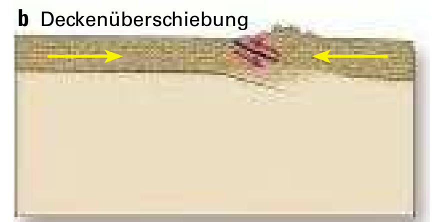
Das gleiche Risiko besteht am anderen Ende des Mittelmeers. Im Libanon liegt eine Deckenüberschiebung auf der gewundenen Spur der großen Levantinischen Verwerfung, die sich entlang der Mittelmeerküste von Ägypten bis zur Türkei zieht. Die Deckenüberschiebung hat eine gewaltige Verdickung der Erdkruste zur Folge, die sich zum Teil unter Wasser befindet. Auch hier besteht die Gefahr eines großen Tsunamis, wenn sich dieser Schild infolge eines Erdbebens anhebt.

Normale Verwerfungen

Auch wenn sich Kontinentalplatten voneinander entfernen, kann es Erdbeben und Tsunamis geben. In diesem Fall rutscht die obere von zwei Platten ruckartig von der unteren ab, wodurch der Meeresboden rasch absackt und die Wasseroberfläche sich eindellt. Diese so genannten normalen Verwerfungen (Bild c, rechts) sind ebenfalls stark segmentiert, mit einer typischen Segmentlänge von 10 bis 30 Kilometern. Die Beben sind hier selten stärker als 6,5.

Bei den Antillen zerteilen große normale Verwerfungen den vulkanischen Bogen der Karibischen Platte, insbesondere um den Archipel von Guadeloupe.







Eine solche 20 Kilometer lange Verwerfung brach am 21. November 2003 südlich von Guadeloupe mit einer Stärke von 6,3 auf, wodurch der Meeresgrund um rund einen halben Meter absank. Die Wellen des Tsunamis erreichten in einigen kleinen, exponierten Buchten an der 10 Kilometer entfernten Küste durch Trichterwirkung eine Höhe von vier Metern. Opfer waren nicht zu beklagen.

Diese Verwerfung ist kürzlich sehr präzise anlässlich einer französischen Ozeanografie-Kampagne kartiert worden. Dabei wurden auch zahlreiche weitere unterseeische normale Verwerfungen entdeckt und genauer lokalisiert. Einige davon sind etwa 50 Kilometer lang. Würden diese auf einen Schlag aufbrechen, käme es zu einem Erdbeben der Stärke 7 oder mehr. Große Tsunamis wären in bis zu 100 Kilometer Entfernung zu befürchten.

Im Mittelmeer finden sich normale Verwerfungen unter Wasser im Wesentlichen am Ostrand Siziliens (insbesondere ist die Meerenge von Messina durch eine normale Verwerfung entstanden), im Norden des Peleponnes (der Golf von Korinth öffnet sich mit einer Geschwindigkeit von 1,5 Zentimeter pro Jahr), am Westrand der Insel Euböa und nördlich von Athen. Sie bedecken auch den gesamten Grund des Ägäischen Meers, der sich nach Süden ausdehnt. Eine dieser Verwerfungen verursachte 1908 das Erdbeben von Messina mit einer Stärke von etwa 7,5. Der dadurch ausgelöste Tsunami mit bis zu acht Meter hohen Wellen überschwemmte die benachbarten Küsten von Sizilien und Kalabrien.

Außer Erdbeben gibt es andere natürliche Ursachen für einen gewaltigen Tsunami:

◀ Die drei Mechanismen der Erdbebenentstehung: Bei der Subduktion taucht eine von zwei Kontinentalplatten, der anderen ausweichend, in den Erdmantel ab (a). Bei der Deckenüberschiebung sinkt die untere Platte nur wenig ab (b). In beiden Fällen ist die Erdbebengefahr gering, wenn die beiden Platten einigermaßen frei aneinander entlanggleiten. Im Fall einer Verklemmung allerdings bauen sich Spannungen auf, bis es zum Bruch kommt. Bei der normalen Verwerfung entfernen sich die Platten voneinander, wodurch sich eine Spalte eröffnet (c).

- unterseeische Hangrutsche;
- unterseeische Vulkanausbrüche;
- Abbruch der Flanke eines Vulkans, dessen Gesteinsschutt ins Meer stürzt;
- große Meteoriten, die an jedem Ort einschlagen können.

Ein unterseeischer Hangrutsch wird manchmal durch starke seismische Erschütterungen ausgelöst. So ist es oft schwierig zu unterscheiden, ob das Beben selbst oder erst der nachfolgende Erdrutsch einen Tsunami verursacht hat. In Papua-Neuguinea überflutete 1998 eine gigantische, stellenweise 15 Meter hohe Welle einen rund 10 Kilometer langen Küstenabschnitt und kostete 3000 Menschen das Leben. Sie folgte auf ein Beben der Stärke 7,2. Berechnungen zeigten, dass 90 Prozent der Amplitude des Tsunamis auf einen unterseeischen Hangrutsch zurückzuführen waren, der durch das Erdbeben ausgelöst wurde.

Hangrutsche

Die Küsten des Mittelmeers sind von solchen Ereignissen in besonderem Maße bedroht. Bereits Erdbeben der Stärke 6 oder etwas darüber, die an normalen Verwerfungen und Deckenverschiebungen des Mittelmeers entstehen, können die unterseeischen Hänge in Bewegung setzen, die sich in Küstennähe in der Fortsetzung zahlreicher Flussdeltas finden. Obendrein haben frühere Erdbeben ihren Nachfolgern das Material für derartige Lawinen zurechtgelegt: Rutschungen haben über Hunderttausende von Jahren hinweg hohe Steilhänge und zerklüftete Reliefs geschaffen. Ein Tsunami, der im seismisch aktiven Gebiet des Ligurischen Meeres entsteht, könnte die französische Côte d'Azur verwüsten.

Das älteste überlieferte katastrophale Ereignis dieser Art fand in Griechenland statt. Im Jahre 373 v. Chr. zerstörte ein Beben die mächtige griechische Stadt Helike an der Südküste des Golfs von Korinth. Einige Stunden später (die Chroniken sind in diesem Punkt nicht sehr genau) wurde die Stadt durch einen Tsunami überflutet. Ihre Ruinen sollen noch über Jahrhunderte hinweg unter Wasser zu sehen gewesen sein. Nach modernen Interpretationen dieses Berichts haben seismische Erschütterungen einen gewaltigen unterseeischen Hangrutsch ausgelöst. Dieser erzeugte eine große Welle, welche die tiefer gelegenen Teile der Stadt überflutete und einen mehr als einen Kilometer langen Küstenstreifen



STEVEN N. WARD, UNIVERSITY OF CALIFORNIA, SANTA CRUZ

Wenn die steile Flanke des Vulkans Cumbre Vieja auf der Kanarischen Insel La Palma abrutschen sollte, könnten 500 Kubikkilometer Gestein auf einmal ins Meer stürzen. Nach einer – umstrittenen – Computersimulation von Stephen N. Ward und Simon Day würde in diesem Fall ein Tsunami (in der Grafik lila-rot) über den Atlantik rasen und noch die amerikanische Ostküste zehn Meter hoch überspülen.

einschließlich des Hafens von Helike etwa zehn Meter tief unter Wasser setzte.

Der bedeutendste Mittelmeer-Tsunami des 20. Jahrhunderts wurde am 9. Juli 1956 durch ein Seebeben mit einer geschätzten Stärke von 7,5 ausgelöst. Es ereignete sich an einer normalen Verwerfung im Ägäischen Meer zwischen den Inseln Amorgos und Astypalaia. Die Wellen erreichten bei den Inseln 20 Meter Höhe. Noch an der Nordostküste Kretas, 100 Kilometer weiter südlich, waren sie an die drei Meter hoch. Diese Amplituden entsprechen mehr als dem Fünffachen dessen, was die Vertikalbewegung des Meeresbodens allein hätte verursachen können. Man führt die Diskrepanz auf einen gewaltigen Hangrutsch zurück, und in der Tat gibt es sehr steile unterseeische Reliefs in diesem Gebiet.

Unter den Vulkanausbrüchen ist die Explosion der Insel Santorin im Ägäischen Meer um 1650 v. Chr. ein herausragendes und historisch überliefertes Ereignis. Sie wurde durch den Einsturz ihrer Caldera (des Vulkankraters) ausgelöst. Ein Tsunami überrollte die Küsten des östlichen Mittelmeers, dessen Wellenhöhe in der Umgebung der Insel auf rund 40 Meter geschätzt wird.

Auf den Antillen sind bei sämtlichen aktiven Vulkanen irgendwann in ihrer Geschichte gewaltige Gesteinslawinen – bis zu mehreren Dutzend Kubikkilometer Material – von den Flanken ins Meer gerutscht. Ihre Spuren findet man noch an vierzig Kilometer entfernten Küsten. Die ausgelösten Wellen dürften weit über zehn Meter hoch gewesen sein.

Von der Flanke des Vulkans Cumbre Vieja auf der Kanarischen Insel La Palma könnte seismischen Untersuchungen zufolge die ungeheure Menge von 500 Kubikkilometer Gestein zu Tal gehen.

Zum Glück sind solche Hangrutsche äußerst selten. Bei Guadeloupe fand der letzte Hangrutsch vor ungefähr 3100 Jahren statt. Doch ein Risiko bleibt.

So bleiben weder das Mittelmeer noch die Antillen von Tsunamis grundsätzlich verschont, auch wenn dort der Untergrund zu solch katastrophalen Erschütterungen wie in Sumatra gar nicht fähig ist. Immerhin reichen, wie die Geschichte zeigt, die Auswirkungen der Wellen allenfalls in eine Entfernung von einigen hundert Kilometern vom Ursprung.

Aus der geringen Entfernung zwischen Auslöse- und Wirkort folgt allerdings auch eine kurze Laufzeit für die Schwerewelle: einige Minuten bis zu etwa einer halben Stunde.

Alarm: was tun?

Für diese kurze Vorwarnzeit sind die derzeit installierten Alarmsysteme im Pazifik nicht gerüstet. Sie benötigen zurzeit eine Viertelstunde, um die ersten Erdbebensignale richtig einzuschätzen, sie mit den Meldungen von Gezeitenmessgeräten zu vergleichen und die zuständigen Behörden zu alarmieren. Diese wiederum brauchen eine gewisse Zeit, um die gefährdeten Regionen zu warnen und zu evakuieren.

Denkbar wären automatische Systeme, die schneller und dennoch »intelligent« sind und ihre Information aus den Netzen der seismologischen und Pegelmessstationen beziehen. Sie würden ohne menschliche Beteiligung die Küstenbevölkerung durch Sirenen, über Radio oder Handy warnen. Doch sind solche automatischen Systeme noch nicht hinreichend zuverlässig. Ein falscher Alarm ist keineswegs harmlos, denn er kann Panik und damit eine kleine Katastrophe auslösen; außerdem untergräbt er auf die Dauer die Glaubwürdigkeit des Systems. Wie ein gutes Frühwarnsystem funktionieren soll, ist heute ein ungelöstes Problem.

Für die Wissenschaftler ist die Aufgabe klar definiert, aber schwer. Es gilt Verwerfungen und abrutschgefährdete Steilhänge kartografisch zu erfassen, ihr Potenzial zur Auslösung eines Tsunamis einzuschätzen, bei Erdbeben die Periode ihrer Wiederkehr zu bestimmen und die jeweils jüngsten zu datieren. Und schließlich ist das Auflaufen eines Tsunamis auf die Küsten im Detail zu berechnen, damit man die Aufsteilungseffekte und damit die zu befürchtenden Zerstörungen vorhersagen kann.

Während alle warten, bis ein gut durchdachtes Warnsystem in den wichtigsten Risikogebieten installiert ist, wird die Information der Allgemeinheit über Erdbeben und Tsunamis vernachlässigt. Ohne ein ausreichendes Risikobewusstsein ist aber jedes Warnsystem nutzlos.

Einige sehr vereinfachte Ratschläge können dennoch gegeben werden: Wenn Sie sich an der Meeresküste befinden und starke Erdstöße (von einem starken Beben in der Nähe) oder schwache Erdstöße von mehr als fünf bis zehn Sekunden Dauer (von einem starken, weiter entfernten Beben) spüren, entfernen Sie sich vom Ufer und gewinnen Sie so viel Höhe wie möglich. Handeln Sie genauso, wenn sich das Meer innerhalb weniger Minuten ungewöhnlich weit zurückzieht, auch wenn Sie keinen Erdstoß verspürt haben. Wenn Sie sich auf See befinden, entfernen Sie sich von der Küste. Lassen Sie viel Zeit vergehen, bevor Sie zum Ufer zurückkehren. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEIS



Pascal Bernard ist Physiker und Chef der Abteilung »Sismogénèse« (Erdbebenentstehung) am Institut de Physique du Globe (Institut für terrestrische Physik) in Paris.

Dieser Artikel wurde im Original wenige Tage nach der Katastrophe fertiggestellt und erschien im Februar 2005 in »Pour la Science«. Die vorliegende Version hat die Redaktion von Spektrum der Wissenschaft mit zahlreichen neuen Erkenntnissen aktualisiert.

Qu'est-ce qui fait trembler la terre? A l'origine des catastrophes sismiques. Von Pascal Bernard. EDP Sciences, Paris 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

HERZSCHRITTMACHER

Immer im Takt

Moderne Herzschrittmacher passen sich körperlicher Belastung an.

Von Guido Reetz

Mit regelmäßigen Schlägen pumpt das Herz Blut in unsere Adern, je nach Lebensalter, aktueller Tätigkeit und Trainingszustand zwischen einigen Dutzend bis fast 200-mal pro Minute. Nährstoffe, vor allem aber der lebenswichtige Sauerstoff gelangen so in die entferntesten Regionen des Körpers. Im Lungenkreislauf wird das verbrauchte, venöse Blut wieder mit Sauerstoff aufgeladen und beginnt seine Reise erneut. Dementsprechend komplex ist diese Muskelpumpe: Zwei so genannte Vorhöfe und zwei Hauptkammern müssen aufeinander abgestimmt kontrahieren. Dafür sorgen normalerweise zwei Gruppen spezialisierter Muskelzellen: Der Sinusknoten erzeugt periodisch ein elektrisches Potenzial, das sich über die Vorhöfe zum Atrioventrikularknoten (AV) und weiter über die Hauptkammern ausbreitet. Weil die Leitungsgeschwindigkeit im AV-Knoten langsamer ist, ziehen sich die Vorhöfe zuerst zusammen.

Ist dieses elektrische System gestört, schlägt das Herz zu langsam oder unregelmäßig. Sauerstoffmangel stellt sich ein, der meist das Gehirn zuerst trifft. Schwindel und Ohnmacht, bei totaler AV-Blockierung sogar Herzstillstand können die Folge sein; die Lebenserwartung ist deutlich verkürzt.

Künstliche Herzschrittmacher schaffen Abhilfe, indem sie den Sinusknoten unterstützen beziehungsweise ersetzen oder einen defekten AV-Knoten überbrücken. Dazu erzeugt ein implantierter Mikrochip elektrische Impulse, die den Herzmuskel über eine bis drei Elektroden stimulieren.

Der erste Schrittmacher wurde 1958 in Stockholm implantiert. Mittlerweile hat man weltweit über zwei Millionen dieser Taktgeber eingesetzt; allein in Deutschland sind es jedes Jahr etwa 40 000. Über ihre Elektroden messen die Systeme die natürliche Aktivität des kranken Herzens, um bei Bedarf Impulse abzugeben – künstlicher und natürlicher Rhythmus sollen einander nicht überlagern. Nur wenn der natürliche Reiz innerhalb eines vorgegebenen Zeitintervalls ausbleibt, greift der Schrittmacher ein. Das Verfahren spart außerdem Strom, damit hält die Batterie länger.

Moderne Schrittmacher passen die Herzschlagfrequenz sogar der körperlichen Belastung an. Schießlich würde ein konstanter Takt dem Bedarf selten gerecht werden – er wäre in Ruhe zu hoch und bei Anstrengung zu niedrig. Ein geeignetes Maß für den Grad körperlicher Aktivität ist zum Beispiel das Atemminutenvolumen, das sich bei Anstrengung erhöht. Der Mikrochip misst diesen Wert indirekt: Mit zunehmend gefüllter Lunge steigt der elektrische Widerstand (genauer: die auch von der Stimulationsfrequenz abhängige Impedanz) zwischen einer Elektrode im Herzen und dem Gehäuse des Schrittmachers. Wächst dieser Wert über mehrere Atemzyklen, erkennt der Prozessor den offensichtlich wachsenden Bedarf an Sauerstoff und erhöht die Stimulationsfrequenz. Ein anderes Verfahren misst die bei Anstrengung ebenfalls erhöhte Kontraktionskraft des Herzmuskels. Auch dazu nutzt man die Widerstandsänderungen an der Elektrode, aber nur innerhalb eines Zeitfensters von 100 bis 300 Millisekunden nach einer Stimulation. Bei jeder Kontraktion umschließt der Herzmuskel die vom Blut umspülte Elektrode und erhöht – da sein Gewebe eine geringere Leitfähigkeit hat als Blut – den elektrischen Widerstand. Bei körperlicher Aktivität kontrahiert sich das Herz stärker, umschließt die Elektrode enger – und ihre Impedanz steigt.

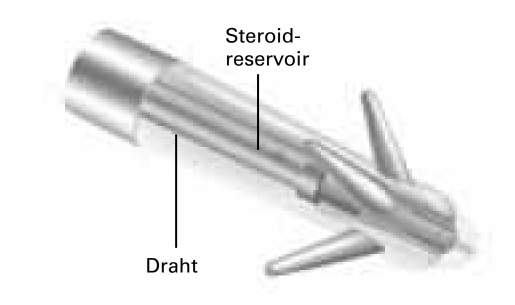
Andere Systeme verwenden so genannte Akzelerometer, um Körperbeschleunigungen zu erfassen. Piezokristalle im Gehäuse reagieren auf die auftretenden mechanischen Kräfte mit elektrischer Spannung. Mit Hilfe solcher frequenzadaptiven Systeme reagieren Schrittmacher auf wechselnde Belastungen, sodass die Patienten in Maßen sogar wieder Sport treiben können. ◁

Guido Reetz ist freier Autor für Medizintechnik in Innsbruck.



ALLE ABBILDUNGEN: ALICE CHEN

Die Vorhof-Elektrode platziert der Arzt in der Nähe des Sinusknotens, damit sich die Erregung wie im gesunden Herzen von dort ausbreitet. In der rechten Hauptkammer legt man die Elektrode in die Herzspitze, wo auch im Normalfall die Kontraktion der zwei Kammern beginnt.



Durch Widerhaken wird die Elektrode im Herzgewebe verankert. Sie misst auch die elektrischen Variablen ihrer Umgebung. Steroide werden eine Zeit lang aus einem Reservoir abgegeben, um Entzündungen zu unterdrücken.

Beschleuni-
gungsmesser

Signal-
prozessor

vom
Körper

in den Körper

Hohl-
vene

zu den Lungen

von den Lungen

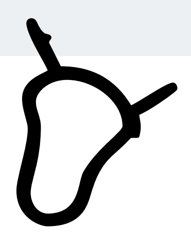
linker
Vorhof

Sinus-
knoten

linke
Kammer

rechter
Vorhof

AV-
Knoten



Vom Rinderkopf zum Abc

Das lateinische Alphabet ist der Endpunkt einer Schriftentwicklung, die vor 3500 Jahren auf dem Sinai begann. Unlängst ließen sich neue Prinzipien aufdecken, die den Gestaltwandel der Buchstaben von ihren bildhaften Ursprüngen zu den heutigen abstrakten Zeichen steuerten.

Von Herbert E. Brekle

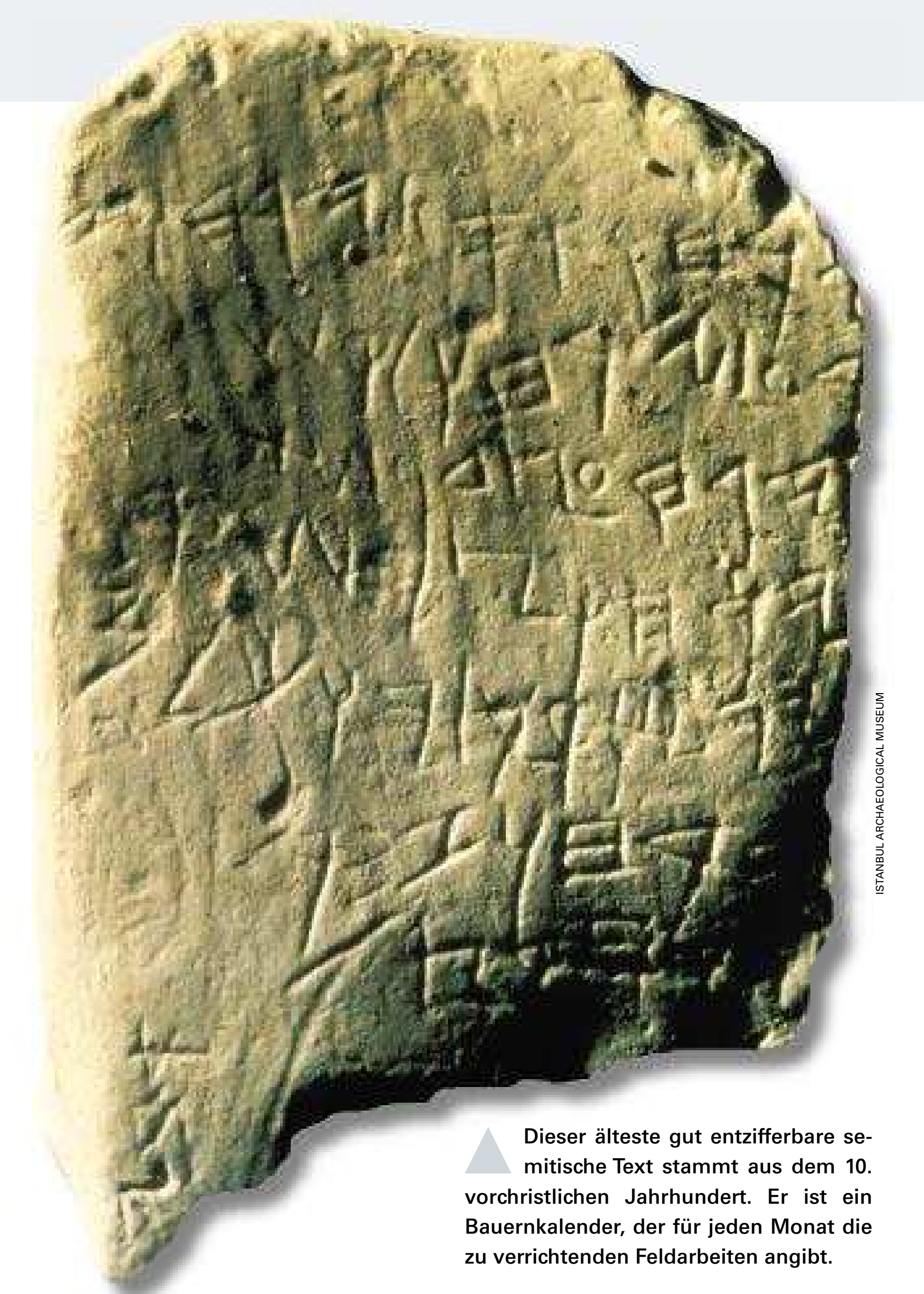
Wie sähe unsere Welt wohl ohne Schrift aus? Es gäbe keine Zeitungen und Zeitschriften, keine Bücher und Schulhefte sowie – was zur Not verschmerzbar wäre – keine flimmernde Neonreklame. Erfahrungen könnten nicht aufgezeichnet und der Nachwelt allenfalls mündlich überliefert werden. Ohne Schrift sind Zivilisationen kaum vorstellbar.

Wir alle lesen und schreiben, das Alphabet ist für uns etwas Selbstverständliches. Dabei denkt kaum jemand darüber nach, woher die Buchstaben eigentlich kommen, die wir heute benutzen. Schließlich waren sie keine spontane Erfindung, sondern haben einen langen Entwicklungsprozess durchlaufen.

Unser Abc begann seine Reise durch Zeit und Raum vor rund dreieinhalb Jahrtausenden in Ägypten. Dort schufen Semiten in Anlehnung an die Hieroglyphen die so genannten altsinaitischen Buchstabenformen. Aus dieser archaischen, noch sehr bildhaften Schrift entwickelte sich zunächst das phönizische Alphabet. Von den levantinischen Händlern und Seefahrern nach Griechenland exportiert, gelangte es in jeweils modifizierter Form dann zu den Etruskern, den Römern und schließlich zu uns.

Den unablässigen Wandel, dem die Gestalt der Buchstaben auf dieser Reise unterlag, können die Sprachwissenschaftler schon seit Langem sehr genau nachzeichnen. Schwerer tun sie sich jedoch damit, die Gründe dafür zu verstehen. Zwar ist das allgemeine Streben nach Vereinfachung und Abstraktion der Schriftzeichen deutlich zu erkennen, aber vieles an den Veränderungen erschien den Linguisten bisher als Ergebnis bloßen Zufalls.

Zweifellos war an der Entwicklung unserer Schrift immer wieder der Zufall beteiligt – aber eher in der Weise, in der er auch die biologische Evolution beeinflusst hat: Er schuf Varianten, deren Tauglichkeit sich in den Anforderungen des Alltags erweisen musste. In Wahrheit stecken hinter den Gestaltänderungen



ISTANBUL ARCHAEOLOGICAL MUSEUM

Dieser älteste gut entzifferbare semitische Text stammt aus dem 10. vorchristlichen Jahrhundert. Er ist ein Bauernkalender, der für jeden Monat die zu verrichtenden Feldarbeiten angibt.

der Buchstaben wie der Lebewesen letztlich Anpassungen an äußere Gegebenheiten – im Fall der Schrift etwa an verschiedene Schreibmaterialien. Dabei wirkten Selektionskriterien, welche die Fortentwicklung steuerten, insbesondere die Bedingungen der Schreibmotorik und der Vorteil schneller, eindeutiger Erkennbarkeit durch unser visuelles System. Sie haben die Buchstabenformen seit der Bronzezeit stetig modifiziert, vereinfacht, prägnanter gestaltet und dabei Schritt für Schritt optimiert.

Eine große Rolle spielte dabei, wie ich festgestellt habe und hier aufzeigen möchte, eine von den Phöniziern eingeführte Strukturierung eines Großteils der Schriftzeichen, die ich als Hasta+Coda-Struktur bezeichne. Im Zusammenspiel mit Symmetrieeigenschaften liefert sie einige einfache Grundprinzipien, mit denen sich die Formentwicklung der lateinischen Buchstaben erstmals nicht nur empirisch adäquat erfassen, sondern auch theoretisch erklären lässt.

Die semitische Basis unseres Alphabets

Kehren wir also noch einmal zum Ursprung unseres Alphabets zurück. Um 1500 v. Chr. gab es auf der Halbinsel Sinai, die zum ägyptischen Herrschaftsbereich gehörte, semitische »Gastarbeiter«. Vermutlich in Kenntnis der hieroglyphischen Symbole Ägyptens erfanden diese eine rein alphabetische Schrift, bei der ein Zeichen jeweils nur einen bestimmten Laut repräsentierte. Die Hieroglyphen dagegen waren eine Mischung aus Wort- und Konsonantenschrift, in der manche Symbole für einen Mitlaut, andere dagegen für ein komplettes Wort standen.

Die Buchstaben des Alphabets, das die Semiten auf der Sinai-Halbinsel schufen, umfassten ebenfalls nur die Konsonanten des von ihren Erfindern gesprochenen Dialekts – ungefähr so, wie wenn wir statt »Buchstabe« einfach »Bchstb« schreiben würden. Eine solche Schrift war der Struktur des Semitischen angemessen und ist auch heute noch im Hebräischen und Arabischen gebräuchlich. Die ersten der in Stein gehauenen Texte dieser Art enthalten Götteranrufungen und Weiheäußerungen.

Vor etwa 3500 Jahren entstand diese altsinaitische Inschrift (rechts). Die noch bildhaft wirkenden Zeichen ähneln teils ägyptischen Hieroglyphen, repräsentieren aber – anders als diese – nur Einzellaute. Diverse Rekonstruktionen des Textes wurden versucht (links ein Beispiel). Er ist jedoch zu bruchstückhaft und schlecht erhalten, als dass sich eine verlässliche Übersetzung geben ließe.

Die altsinaitischen Buchstabenformen waren noch sehr bildhaft: Ein Rinderkopf symbolisierte zum Beispiel den semitischen glottalen Knacklaut /ʾ/, der auch im Deutschen bei anlautenden Vokalen auftritt. Eine Schlange stand dagegen für /n/, ein Hausgrundriss für /b/ und so weiter. (Zwischen Schrägstrichen notieren Sprachwissenschaftler die Lauttypen einer Sprache, die so genannten Phoneme.)

Der Buchstabe repräsentierte dabei den Anlaut des semitischen Worts für das dargestellte Objekt. Ein Rinderkopf für »Rind«, das auf semitisch *ʾalep* heißt, stand also für den initialen Knacklaut dieses Worts /ʾ/. Analog leitete sich /b/ von *bet* für »Haus« ab. Die Buchstaben *kap* (»Hand«) für /k/ und *mem* (»Wasser«) für /m/ erscheinen in der bildhaften Ursprungsphase der altsinaitischen Schrift als und . Das erste Zeichen stellt eine menschliche Hand mit weggedrehtem Daumen dar. Das Wasser wird durch eine gekräuselte Wasseroberfläche veranschaulicht.

Nach dem Motto »Alles ist eine Sache der Routine« vereinfachten die semitischen Schreiber mit wachsender Schreibpraxis in den Jahrhunderten bis etwa 1100 v. Chr. das Formeninventar ▷

▷ ihres frühen Alphabets. Sie wollten die Buchstaben mit Griffel oder Rohrfeder flüssiger schreiben und gestalteten sie im Vergleich mit den frühen bildhaften Zeichen deshalb abstrakter und einfacher. Die Symbole wurden dadurch zugleich eindeutiger und einprägsamer. Allerdings verloren sie zunehmend die Ähnlichkeit mit dem Bild, die zunächst als Gedächtnisstütze gedient hatte.

Im Zuge dieses Abschleifens wurde zum Beispiel *kap* zunächst zu vereinfacht, verlor also eine der vier gabelförmigen Spitzen. Als die Phönizier schließlich vor etwa 3000 Jahren das semitische Alphabet übernahmen und fortentwickelten, gingen sie noch einen erheblichen Schritt weiter: Sie gaben dem Buchstaben *kap* die Form .

Wie lässt sich diese Verwandlung erklären? Zwar wurden die semitischen Schriften von rechts nach links gelesen und – was die Abfolge der Buchstaben angeht – auch so geschrieben. Beim Zeichnen der Buchstaben selbst aber – etwa der drei Striche von – bewegten die semitischen Schreiber die Hand sehr wahrscheinlich von links nach rechts.

Erfindung des finalen Abstrichs

Man kann sich nun leicht vorstellen, wie sich dabei der dritte Strich im Schwung der Handmotorik als finaler Abstrich nach unten verlängerte. Die Phönizier perfektionierten diese Neuerung, indem sie die ersten beiden Striche von zu einem Winkel verbanden, den sie nach links drehten. Damit setzte sich der Buchstabe nun aus zwei Elementen zusammen, die sich flott schreiben ließen: einem kurzen Haken › und einem finalen Abstrich /, der die Winkelspitzen berührt – wodurch sich ergibt.

Diese Zweiteilung lässt sich bei etwa der Hälfte der 22 phönizischen Buchstaben beobachten. Ich habe den beiden Strukturelementen deshalb eigene Bezeichnungen gegeben. Das erste, linke Element nenne ich Coda (italienisch »Schwanz«, aus lateinisch *cauda*), das zweite, rechte dagegen Hasta (lateinisch »Stange, Speer«). Als finaler Abstrich gleicht die Hasta nämlich einer senkrechten »Stange«. Die Coda wiederum bildet von der Leserichtung her, die von rechts nach links geht, den »Schwanz« – auch wenn sie beim Schreiben des Buchstabens natürlich zuerst kommt.

Mit dieser Zweiteilung kann man auch zwanglos erklären, wie sich *mem* (»Wasser«) und *nun* (»Schlange«) zu den Formen und weiterentwickelten. Man erkennt klar, dass die beiden Zeichen – wiederum auf Grund der Schreibmotorik – gleichfalls einen senkrechten finalen Abstrich erhielten.

Bei *waw* (»Keule«) und *rosch* (»Kopf«) ist die Hasta+Coda-Struktur sogar schon in den frühesten bildhaften Formen der Buchstaben angelegt. Das erstgenannte Zeichen entwickelte sich über zu der einzügig geschriebenen Form , bei welcher der Codabogen links oben an der Hasta sitzt. Analog wurde *rosch* zu vereinfacht. Aus Hinterkopf- und Nackenlinie entstand dabei der finale Abstrich, an dem links oben das zu einem Winkel stilisierte Gesichtsprofil als Coda sitzt.

Die Hasta+Coda-Struktur speist sich also aus zwei Quellen. Zum einen lässt der Schreibschwung einen mehr oder weniger vertikalen Abstrich entstehen. Zum anderen geht die Linienführung, die schon den frühesten bildhaften Zeichen innewohnt, durch schreibmotorische Vereinfachung oft wie von selbst in eine Hasta+Coda-Struktur über.

Die Buchstaben erhalten auf diese Weise zugleich eine Richtung: Sie wer-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

◀ **Auf der – teilweise restaurierten – Mesha-Stele, die um 840 v. Chr. entstand, erscheinen die semitischen Schriftzeichen, die nur für Konsonanten stehen, schon stark vereinfacht und abstrahiert.**

den zu Vektoren, die nach links weisen. Damit unterstützen sie die linksläufige Lese- und Schreibrichtung (was die Reihenfolge der Buchstaben angeht). Das Resultat ist eine hohe Gleichförmigkeit sowohl beim Niederschreiben der Texte als auch beim Wahrnehmen und Dekodieren der Buchstaben, die der Leser ja damals von rechts nach links verarbeitete. Dadurch ging einerseits das Schreiben flüssiger von der Hand, während andererseits auch das Erkennen und Verstehen leichter fiel – ein doppelter Vorteil, der mit dem Übergang zum phönizischen Alphabet verbunden war.

»ʾalep«, sagt der Phönizier langsam und hält seinem griechischen Schüler im Schein eines flackernden Öllämpchens ein Täfelchen mit dem Buchstaben 𐤀 vor die Nase. So fährt er fort, Täfelchen für Täfelchen, bis er das ganze phönizische Abc durchhat: 𐤀 – »ʾalep«, 𐤁 – »bet«, 𐤄 – »he«, 𐤅 – »waw«, 𐤉 – »yod«, 𐤏 – »ʿayin« und so weiter. Die Szene ist nicht verbürgt, aber so ähnlich könnte sich die Weitergabe des Alphabets von einem Phönizier an einen lernbegierigen Griechen abgespielt haben. Der Zeitpunkt der Übernahme wird heute auf etwa 800 v. Chr. datiert.

Übernahme des phönizischen Alphabets durch die Griechen

Für den armen griechischen Schüler stellte sich ein Problem: Einige Anfangslaute der phönizischen Buchstabennamen hörten sich für ihn sehr fremdartig an und hatten vor allem keine Entsprechung in seiner indoeuropäischen Sprache. Doch er fand schnell eine Lösung: Er nahm stattdessen verwandt klingende Laute, die ihm vertraut waren (Bild unten rechts). So ersetzte er etwa bei *ʾalep* das glottale /ʾ/, das in seiner Muttersprache nicht existierte, durch das ihm lautlich ähnlich erscheinende /a/. Das hatte den angenehmen Nebeneffekt, dass die so umgedeuteten Buchstaben die griechischen Vokale repräsentieren konnten; denn auch die semitischen Phönizier schrieben nur die Konsonanten. Damit verfügten die Griechen nun über ein Alphabet, mit dem sie die meisten Laute ihrer Sprache einigermaßen genau schriftlich abbilden konnten.

Die frühesten griechischen Inschriften zeigen praktisch noch dieselben Buchstabenformen wie die ungefähr zeitgleichen phönizischen. Die ersten größeren Veränderungen betrafen die Buchstaben *alpha, beta, delta* und *iota*. So wandelte sich das 𐤀 zunächst zu ≮ – das Maul des Rinds weist also nicht mehr nach links unten, sondern nach rechts oben. Durch eine weitere Drehung gegen den Uhrzeigersinn wurde es dann sozusagen auf die Füße gestellt: A. Damit passte es sich zugleich optimal an die Hasta+ Coda-Struktur an.

Durch horizontale Spiegelung des phönizischen 𐤁 ergab sich B, manchmal auch schon mit zwei Halbbögen als B geschrieben. Man beachte, dass die Hasta+ Coda-Struktur dabei gewahrt blieb. Das phönizische *dalet* 𐤃 erscheint als *delta* in drei Varianten: ◁, D und Δ. Die ersten beiden zeigen wiederum die typische Hasta+Coda-Struktur, die zweite – mit Rundung zur Beschleunigung des Schreibens – begegnet uns schließlich als kanonische Form im römischen Alphabet (wo sie im Zuge der Umstellung auf die rechtsläufige Schreibweise gespiegelt wird). Die dritte, axialsymmetrische Variante entspricht der klassischen und modernen griechischen Delta-Form. Das hakenförmig gebogene *iota* wurde sehr früh durch einen einfachen vertikalen Strich I ersetzt, was einer Hasta ohne Coda entspricht.

Auch in einem anderen Punkt wichen die Griechen von ihren phönizischen Lehrmeistern ab: Sie hielten sich nicht mehr strikt an die linksläufige Schreib- und Leserichtung. So sind frühe griechische Texte teilweise schon rechtsläufig. Noch interessanter erscheint ▷

▶ **Um 1000 v. Chr. übernahmen die Phönizier das semitische Alphabet in abgewandelter Form. Mit Ausnahme der Laute /d/ und /p/ ist die Beziehung zu den altsinaitischen Buchstaben klar erkennbar. Die Hälfte der Zeichen enthält am Ende einen mehr oder weniger senkrechten Abstrich.**

/ Lautwert /	altsinaitisch	phönizisch
/ʾ/		
/b/		
/g/		
/d/		
/h/		
/w/		
/z/(d̠)		
/ḥ/		
/y/		
/k/		
/l/		
/m/		
/n/		
/ʿ/		
/p/		
/ṣ/		
/q/		
/r/		
/š/(t̠)		
/t/		

HERBERT E. BREKLE

▼ **Etwa 800 v. Chr. adaptierten die Griechen das phönizische Alphabet. Dabei deuteten sie Konsonanten, die es in ihrer eigenen Sprache nicht gab, in Vokale um.**

𐤀	ʾAlep	/ʾ/ (ein glottaler Knacklaut)	→	≮	Alpha	/a/
𐤄	he	/h/	→	𐤄	epsilon	/e/
𐤅	waw	/w/ (ein bilabialer u-Laut)	→	Y	upsilon	/u/
𐤉	yod	/i/	→	ʅ	iota	/i/
𐤏	ʿayin	/ʿ/ (ein stimmhafter Rachenlaut)	→	O	omikron	/o/

HERBERT E. BREKLE

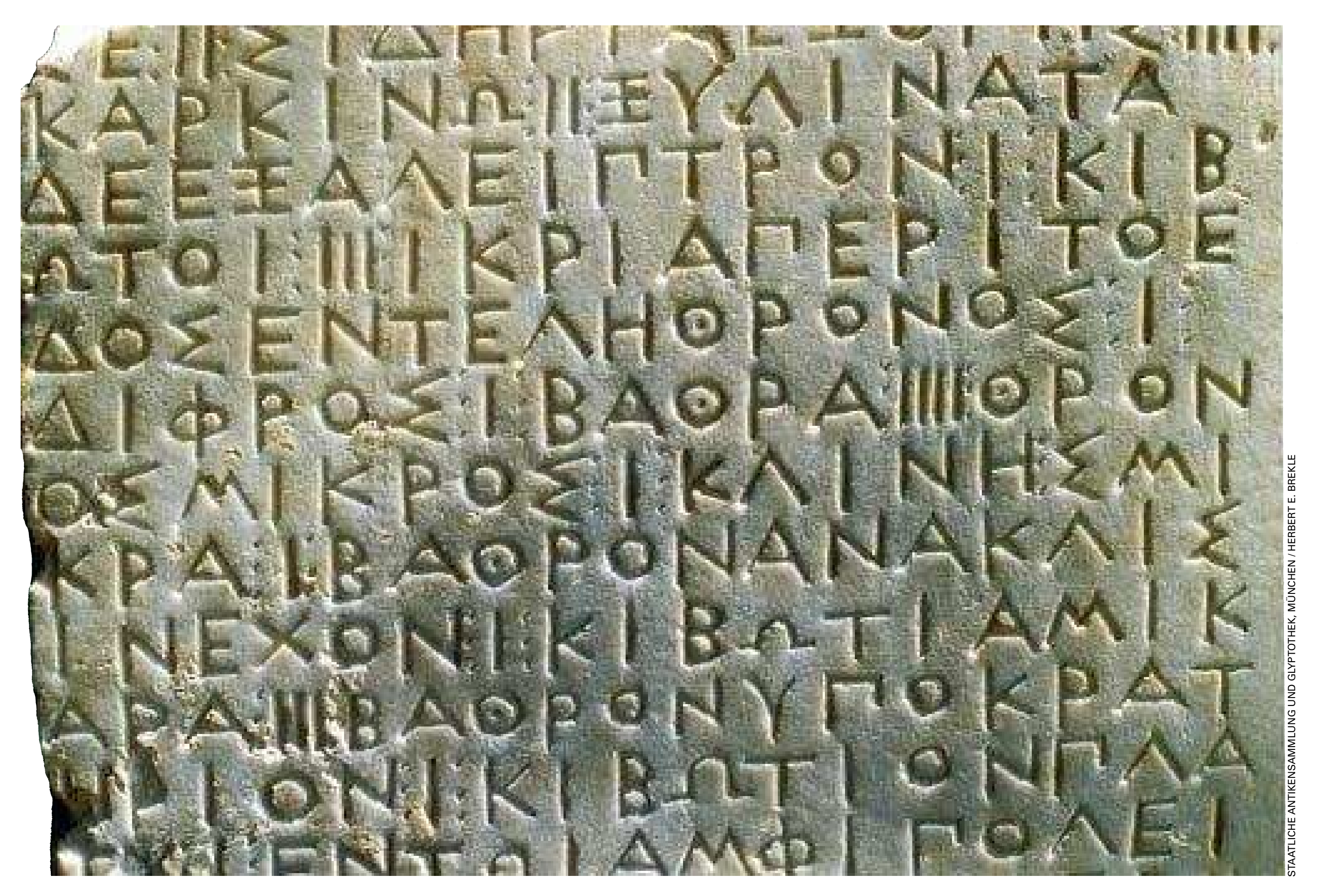
▷ eine Mischform, bei der die Schreibrichtung von Zeile zu Zeile wechselt. Die Griechen prägten dafür die anschauliche Bezeichnung *boustrophedon*, also »wie der Ochse pflügt«. Im diesem Fall muss das Auge am Zeilenende nicht zum Anfang der nächsten Zeile springen, sondern kann einfach »rückwärts« weiterlesen.

Dabei fällt auf, dass die Buchstaben mit Hasta+Coda-Struktur in ihrer Orientierung immer der jeweiligen Schreibrichtung folgen: Die Coda blickt gewissermaßen stets nach vorn. Offenbar betrachteten die altgriechischen Schreiber und Leser die Schriftzeichen also nicht als eine beliebige Kombination von Linienzügen, sondern als gerichtete Symbole. Dies belegt, wie tief die Hasta+Coda-Struktur bereits in ihrem Denken verankert war.



Da die Buchstaben stets in Leserichtung zeigten, kehrte sich ihre Orientierung bei *boustrophedon*-Texten von einer Zeile zur nächsten um: Jede zweite Zeile erschien gewissermaßen in Spiegelschrift. So folgerichtig das war, verlangte es vom Schreiber und Leser jedoch eine erhebliche gedankliche Leistung: Beide mussten ihr neuronales Programm zur Produktion und Erkennung der Texte von Zeile zu Zeile jeweils völlig umstellen. Buchstaben mit einer vertikalen Symmetrieachse waren da ein Segen; denn sie blieben sich gleich. Dazu zählten anfangs allerdings nur einige wenige, nämlich I *zeta*, später schreibmotorisch zu Z vereinfacht, ⊟ *(h)eta*, aus dem schließlich H wurde, ⊗ *theta*, ○ *omikron*, ⊤ *tau* und die von den Griechen selbst erfundenen Zusatzbuchstaben Φ *phi*, X *chi*, Ψ *psi* und Ω *omega*. Ungefähr im 6. vorchristlichen Jahrhundert wurden dann auch die Formen von A, Δ, M, N und Y symmetrisiert. Der Grund dafür liegt auf der Hand: Die Axialsymmetrie sollte das Erkennen der Buchstaben bei wechselnden Schreibrichtungen erleichtern.

◀ **Anders als die Phönizier, die strikt von rechts nach links schrieben, handhabten die frühen Griechen die Schreibrichtung variabel. So gab es neben linksläufigen Texten (oben) auch rechtsläufige (Mitte) sowie solche, in denen die Schreibrichtung von Zeile zu Zeile wechselte (unten). Die anschauliche Bezeichnung dafür lautet *boustrophedon*, »wie der Ochse pflügt«.**



STAATLICHE ANTIKENSAMMLUNG UND GLYPTOTHEK, MÜNCHEN / HERBERT E. BREKLE

Spätestens im 4. vorchristlichen Jahrhundert hatte sich in Griechenland die rechtsläufige Schreibweise durchgesetzt. Das dokumentiert unter anderem diese Tempelinventar-Inschrift von etwa 410 v. Chr.

Spätestens im 4. Jahrhundert vor unserer Zeitrechnung setzte sich im griechischen Raum schließlich die rechtsläufige (dextrograde) Schreibart durch. In gewissem Maße blieb auch dabei das Hasta+Coda-Prinzip erhalten. Die Hasta mutierte einfach vom finalen zum initialen Abstrich. Damit veränderte sich allerdings ihre schreibmotorische Funktion: Sie war nicht mehr Ausdruck der überschießenden Bewegungsenergie am Ende des Buchstabens, sondern des Schwungs, mit dem der Schreiber ein Zeichen begann.

Möglicherweise trat diese Rolle aber auch in den Hintergrund gegenüber der zweiten Funktion des Hasta+Coda-Prinzips: die Buchstaben in Leserichtung zu orientieren und so das Erkennen durch das visuelle System zu erleichtern. Jedenfalls beeinflusste dieses Prinzip, wie sich zeigt, auch die späteren Veränderungen der Buchstabenformen im griechischen und lateinischen Alphabet – möglicherweise als unbewusst beachtetes Regulativ. Das unterstreicht, dass es sich nicht etwa um ein zufälliges Gestaltmerkmal der phönizischen Schrift handelt, sondern um eine tief in neuronalen Prozessen verwurzelte Schreib- und Lesehilfe.

Ehrlicherweise sei allerdings erwähnt, dass das Hasta+Coda-Prinzip bei der innersemitischen Weiterentwicklung der altsinaitischen Schrift zum Hebräischen und Arabischen keine Rolle spielte. Über die Gründe dafür lässt sich bisher nur spekulieren.

Erste Ansätze einer Schreibschrift

Generell ist auch zu bedenken, dass schreibmotorische Faktoren nur dann zum Tragen kommen konnten, wenn ein Text wirklich mit einem Griffel, einer Feder oder einem anderen Werkzeug von Hand auf eine Unterlage geschrieben wurde. Bei gemeißelten Inschriften dagegen wirkten sie sich naturgemäß nicht unmittelbar aus. Allerdings wurden auch hier die Ergenisse schreibmotorischer Modifikationen oft übernommen. Ausgangspunkt für Veränderungen der Buchstabenform war allerdings meist die Schreibschrift. Bis zu den frühen Griechen stimmte diese mit der monumentalen »Blockschrift« überein. Doch bei der weiteren Wanderung des Alphabets nach Westen begann sich das zu ändern.

Vom griechischen Mutterland gelangte das Abc noch im 8. vorchristlichen Jahrhundert in die griechischen Kolonien in Unteritalien. Von dort übernahmen es die Etrusker und die Römer – mit jeweils geringen Veränderungen. Einen Eindruck von archaischen römischen Buchstabenformen auf Monumenten vermittelt die so genannte *Lapis-niger*-Inschrift aus der Zeit um 600 v. Chr. – übrigens noch nach *boustrophedon*-Art mit alternierender Schreibrichtung. ▷

In der frühlateinischen *Lapis-niger*-Inschrift von etwa 600 v. Chr. wechselt die Schreibrichtung immer noch nach *boustrophedon*-Art.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▷ Daneben muss sich allerdings zunehmend eine Alltagsschrift entwickelt haben, die für die Thematik dieses Artikels wesentlich interessanter ist. Zeugnisse dafür haben sich jedoch zunächst nicht erhalten. Sie finden sich erst ab dem 3. vorchristlichen Jahrhundert. Ein besonders schönes Beispiel stammt aus dem 1. Jahrhundert (Kasten unten). Es ist ein Brief, der mit einer Rohrfeder auf Papyrus, dem meistverwendeten Beschreibmaterial in der Antike, geschrieben wurde.

Die einzelnen Buchstaben erscheinen darin zwar immer noch voneinander abgesetzt, aber man erkennt bereits typische Merkmale unserer heutigen Schreibschrift. Das gilt vor allem für erste Ansätze von Ober- und Unterlängen. Der Unterschied zu etwa gleichzeitig entstandenen Inschriften, die nach einer Vorzeichnung in Stein gehauen wurden, ist augenfällig. Dort füllen die Buchstaben alle exakt den Raum zwischen einer oberen und unteren Begrenzungslinie. In dem Brief dagegen durchbrechen bestimmte Schriftzeichen dieses klassische Zweiliniensystem nach oben und/oder unten. Besonders gut ist das bei Buchstaben wie ꝺ, f, ß, ʃ, ɑ und ɲ (= *r*) zu erkennen.

Noch wesentlich deutlicher werden diese Überschreitungen und ihre Ursachen im ersten nachchristlichen Jahrhundert. Ausgrabungen der römischen Provinzstädte Pompeji und Herculaneum, die der Vesuv bei seinem Ausbruch im Jahr 79 verschüttet hatte, förderten Hunderte von Inschriften zu Tage, die für die Rekonstruktion schreibmotorisch bedingter Veränderungen des Alphabets eine reiche Ausbeute liefern. Ihr Inhalt ist meist alltäglich: Die Schreiber »verewigten« sich mittels Griffel, Pinsel oder Feder auf mineralischen oder Holzoberflächen; der Schreibstil bewegt sich zwischen sorgfältig bis schwungvoll oder nachlässig.

Auf den ersten Blick weisen die Buchstabenformen eine beträchtliche Variationsbreite auf. Beim genaueren Betrachten zeigt sich jedoch, dass die scheinbar regellosen »Ausschweifungen« einzelner Schriftzeichen nach oben und/oder unten letztlich strukturell determiniert sind. Der bestimmende Faktor aber ist abermals das Hasta+Coda-Prinzip.

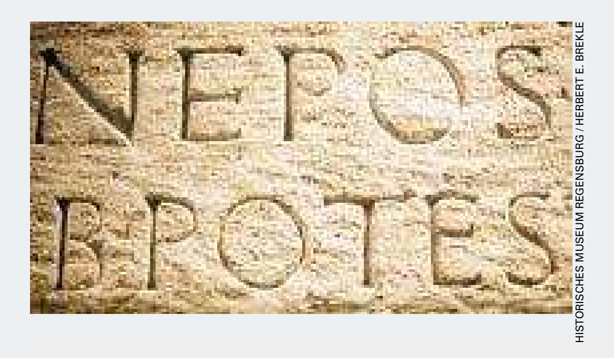
Zum Beispiel enthält eine recht flüchtig mit Tinte auf Holz geschriebene Schulderklärung (rechts im Kasten unten auf dieser Seite) sechs Schriftzeichen, welche die gedachten Begrenzungslinien von Mittellängenbuchstaben wie o, n, und v (das damals noch mit dem u identisch war) nach oben beziehungsweise unten durchbrechen und sich damit in jenem Vierliniensystem bewegen, das auch für die heutige Schreibschrift gilt. Es handelt sich um h (= *h*), ɲ (= *r*), ꝺ (= *d*), ƛ (= *b*), ʃ (= *s*) und f.

Gemeinsam ist diesen Buchstabenformen, dass sie aus einem annähernd vertikalen Abstrich *I*, also einer Hasta, bestehen, an dem jeweils links oder rechts Zusätze – sprich Codae – angebracht sind. So ergeben *I* und ˥ zusammen ein h.

Ein entscheidendes Charakteristikum dieser sechs Schriftzeichen besteht nun darin, dass die Codae den Abstrich nicht völlig umschließen oder beidseitig begrenzen – wie dies etwa in der vorletzten Zeile bei τ in Sextio (im Kasten gelb markiert) zutrifft. Die Hasta ist also in mindestens einer Richtung »frei«, und der Schreiber kann sie dorthin ausschweifen lassen – im Falle des h zum Beispiel nach oben, beim ɲ oder f dagegen nach unten (je nach Position der Coda an der Hasta). Es gilt: Die Codafiguren bleiben grundsätzlich im Feld der Mittellängenbuchstaben, Ober- oder Unterlängen hat nur die Hasta.

Ausschweifende Buchstaben

Neben der Blockschrift (Capitalis) bei in Stein gemeißelten Monumenten – hier ein Ausschnitt der *Castra-regina*-Inschrift vom Osttor des Regensburger Römerlagers (links oben) – entwickelte sich bei Texten, die mit Feder und Tinte auf Papyrus geschrieben wurden, allmählich eine flüssigere Schreibschrift. Ein frühes Beispiel ist ein Brief aus dem 1. vorchristlichen Jahrhundert (links unten). Darin lassen sich bereits Ansätze von Ober- und Unterlängen erkennen. Noch deutlicher treten sie bei Texten in Erscheinung, die im 1. nachchristlichen Jahrhundert auf Holztafeln oder Hauswände in Pompeji (rechts) geschrieben wurden.



HISTORISCHES MUSEUM REGENSBURG / HERBERT E. BREKLE

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Die Entstehung der Kleinbuchstaben

Meiner Überzeugung nach sind diese »pompejianischen Ausschweifungen« die Quelle unserer heutigen, in einem Vierlinienschema gebändigten Kleinbuchstaben (Minuskeln). Bis etwa zum 3. nachchristlichen Jahrhundert kristallisierte sich heraus, welche Zeichen aus dem Variantenpool römischer Alltagsschriften das Kriterium der freien Vertikalhasta erfüllen. Sie sind danach in strengerer Form und in das uns heute vertraute Formeninventar übergangen: *b, d, f, g, h, k, l, p, q (r)* und ʃ (= *s*) (wobei es in der Weiterentwicklung seit karolingischer

Die karolingische Minuskelschrift – hier eine Seite des *Liber Viventium Fabariensis* (Memorialbuch der Abtei Pfäfers) aus dem 9. Jahrhundert vom Stiftsarchiv in St. Gallen – konventionalisierte die Ober- und Unterlängen der spätrömischen Schreibschrift und war der unmittelbare Vorläufer unserer heutigen Kleinbuchstaben.

STIFTSARCHIV ST. GALLEN

Zeit noch Modifikationen gab, die zu erklären hier zu weit führen würde). Alle übrigen Buchstaben verblieben im Mittellängenfeld des Vierlinienschemas. In ihm herrscht folglich die größte optische Informationsdichte – befinden sich dort doch auch grundsätzlich die Codafiguren der Buchstaben mit Ober- und Unterlängen.

Die Gleichförmigkeit in diesem Bereich würde dem visuellen System die Dekodierung schwer machen: Es hätte keine markanten Punkte, an denen es sich schnell orientieren könnte. Die Ober- und Unterlängen liefern nun genau diese Hilfsmittel. Sie geben den Wörtern eine charakteristische Kontur und machen sie dadurch lesepsychologisch schnell verarbeitbar.

Somit haben wir es letztlich dem Schreibschwung der Phönizier zu verdanken, dass wir heute über ein Alphabet verfügen, das unserem Wahrnehmungssystem die Arbeit erleichtert. Indem die damaligen Schreiber den Abstrich als finales Element zahlreicher Buchstaben erfanden, führten sie ein Strukturprinzip ein, das uns heute noch zu Gute kommt – nicht zuletzt auch den Lesern dieser Zeitschrift.

Ob unsere Schrift auf ihrer Reise durch die Zeit wirklich das Optimum erreicht hat, was Schreibbewegung und Lesbarkeit angeht, bleibt offen. Ohnehin ist heute längst die Tastatur an die Stelle des Stifts getreten. Außerdem unterbindet unsere global vernetzte Welt aus Staaten, in denen die Kultusbürokratie auch alle Belange der Schrift regelt, jede natürliche Weiterentwicklung. Nur noch bei den Feinheiten der professionellen Schriftschnitte (wie Times oder Helvetica), welche die grundsätzliche Form der Buchstaben aber nicht mehr antasten, gibt es noch Variationen sowie Untersuchungen darüber, wie sie die Lesbarkeit beeinflussen. Aber das ist eine andere Geschichte. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Herbert E. Brekle ist emeritierter Professor für Allgemeine Sprachwissenschaft an der Universität Regensburg. Er hat nach seiner Ausbildung zum Schriftsetzer an der Universität Tübingen Englische und Romanische Philologie sowie Philosophie studiert und 1963 promoviert. Zu seinen Forschungsgebieten gehören Semantik, Wortbildungstheorie, Geschichte der Sprachwissenschaft und Schriftmorphologie.

Von den Hieroglyphen zum Alphabet. Neue Erkenntnisse zur Herkunft unserer Schrift. Von Karl-Theodor Zauzich. Zaberndruck, Mainz 2005

Die Geschichte der Schrift. Von Andrew Robinson. Verlag Albatros, Düsseldorf 2004

Wer sprach das erste Wort? Die Entwicklung von Sprache und Schrift. Von Martin Kuckenburg. Verlag Konrad Theiss, Stuttgart 2004

Die Geschichte der Schrift. Von Harald Haarmann. C.H.Beck, München 2002

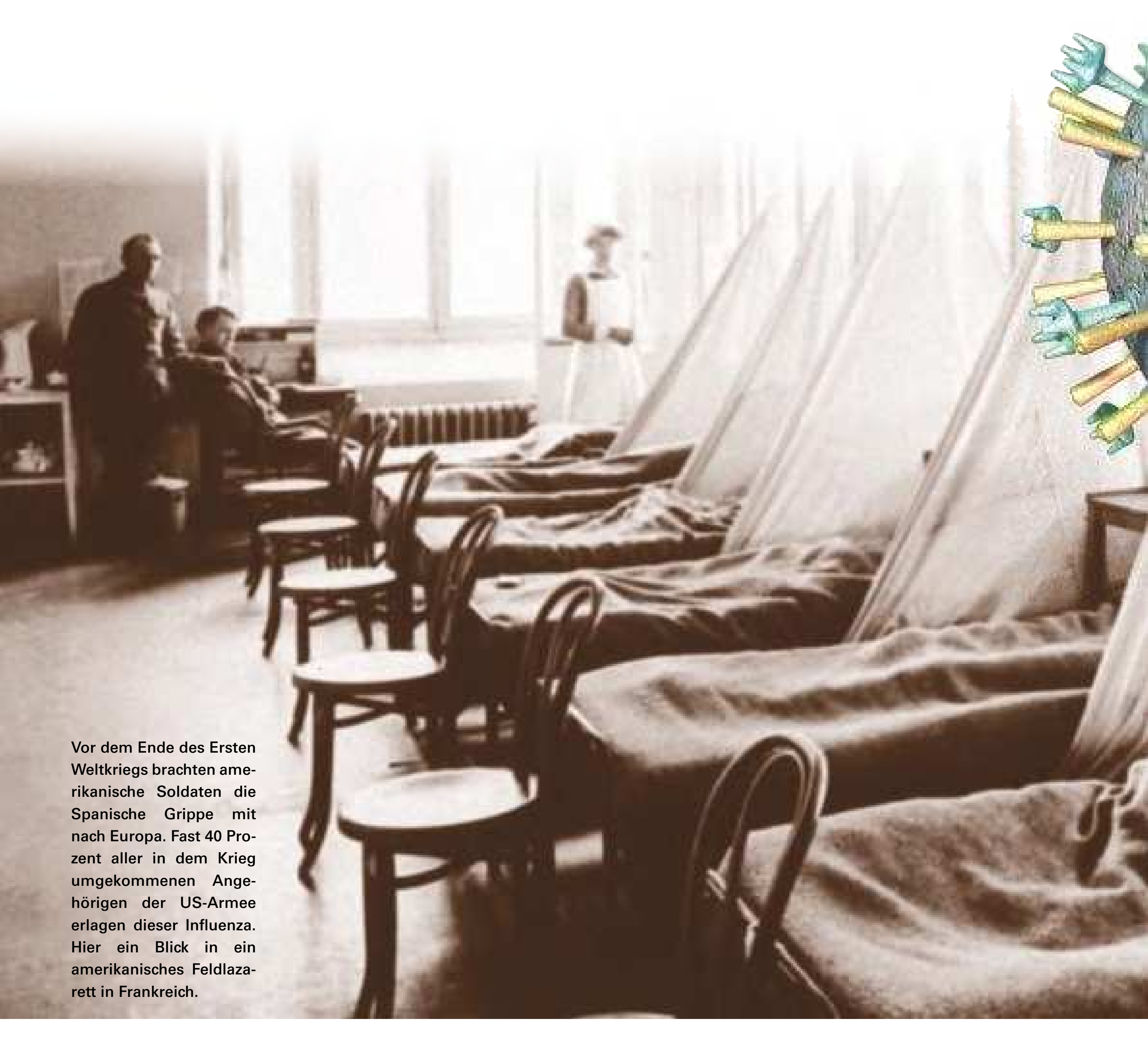
Dynamische (A)Symmetrien: Strukturkonstanten im Entwicklungsprozess unserer Buchstabenformen. Von Herbert E. Brekle in: Blick in die Wissenschaft, Bd. 8, S. 70, 1996

Die Antiqualinie von ca. –1500 bis ca. +1500: Untersuchungen zur Morphogenese des westlichen Alphabets auf kognitivistischer Basis. Von Herbert E. Brekle. Nodus Publikationen, Münster 1994

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

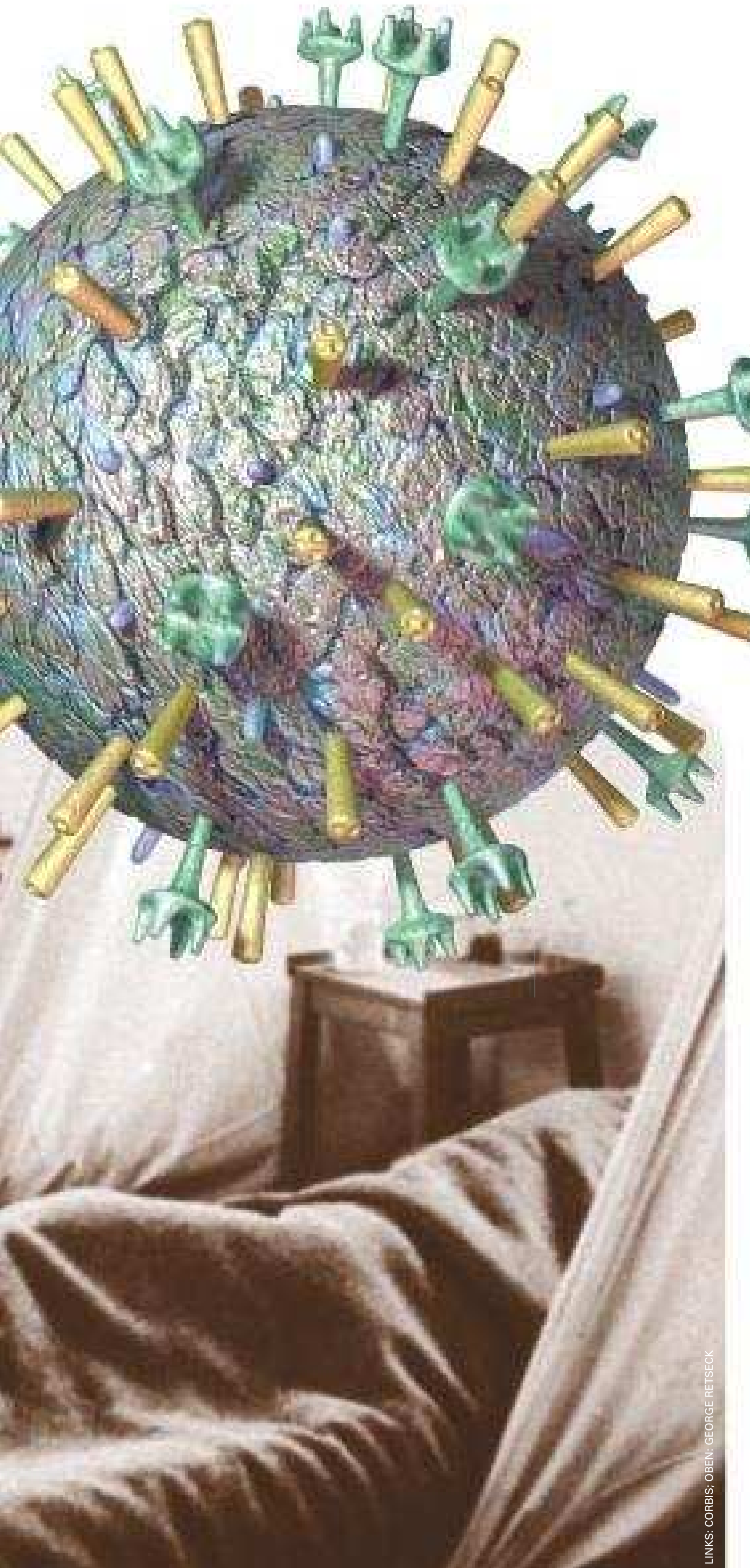
Das Killervirus der

Forscher möchten ergründen, was die Spanische Grippe von 1918/19 so übermäßig aggressiv machte. Dazu haben sie das Genom vom Erreger der bisher schwersten Influenza-Pandemie rekonstruiert.



Vor dem Ende des Ersten Weltkriegs brachten amerikanische Soldaten die Spanische Grippe mit nach Europa. Fast 40 Prozent aller in dem Krieg umgekommenen Angehörigen der US-Armee erlagen dieser Influenza. Hier ein Blick in ein amerikanisches Feldlazarett in Frankreich.

Spanischen Grippe


LINKS: CORBIS; OBEN: GEORGE RETSECK

Von Jeffery K. Taubenberger, Ann H. Reid und Thomas G. Fanning

Zwar ging sie als »Spanische Grippe« in die Medizinchroniken ein. Doch die Influenza, an der vor allem 1918 und 1919 weltweit Millionen Menschen starben, brach zuerst im März des Jahres 1918 in US-Kasernen aus. Amerikanische Soldaten verschleppten sie im April an die französische Front, wo sie bald auch die deutschen Linien heimsuchte. Die Kriegsgegner versuchten einander die Epidemie in ihren Reihen zu verheimlichen. Spanien ging mit dem Grippeausbruch im eigenen Land offener um. Deswegen sah es so aus, als sei die Seuche, die bald auch unter der Zivilbevölkerung grassierte, im Frühsommer von der Iberischen Halbinsel gekommen und habe sich von dort global verbreitet.

Diese Grippepandemie forderte weltweit nach manchen Schätzungen 40 (nach anderen Berechnungen sogar bis zu 50) Millionen Todesopfer, allein in Deutschland unter der Zivilbevölkerung einige Hunderttausend. Sie schlug in drei Hauptwellen zu, zuerst im Frühjahr und Sommer 1918, dann neuerlich und wesentlich heftiger im Herbst des Jahres. Nach einer dritten starken Welle Anfang 1919 flaute ihre Kraft allmählich ab, flackerte nur einige Male leichter wieder auf. Die besonders aggressive zweite Welle erfasste beispielsweise in manchen Militärcamps in den USA jeden dritten Insassen, wobei über die Hälfte der erkrankten Soldaten starb.

Mediziner konnten die Krankheit zunächst nicht einordnen, die Infizierte nicht selten binnen 48 Stunden nach Ausbruch der ersten Symptome dahinraffte. Für eine Grippe, deren verursachenden Erreger man damals noch nicht kannte, erschienen die Anzeichen ungewöhnlich. Betroffene, die so schnell daran starben, erstickten regelrecht: Ihre Lungen ertranken in Flüssigkeit und Blut. Manche Pathologen glaubten darum zunächst an eine besonders aggressive und infektiöse Form der Pest oder an einen neuen, fremdartigen Erreger. Wie wir heute wissen, handelte es sich um eine reguläre Virusgrippe – ausgelöst allerdings durch einen ungewöhnlich virulenten und infektiösen Influenzastamm, der den Epidemiologen bis heute Rätsel aufgibt. Dringend möchten sie seine Eigenschaften und seine Herkunft aufklären, um gegen künftige, ähnlich schwere Seuchenzüge gewappnet zu sein.

Schon in früheren Jahrhunderten wüteten wohl immer wieder schwere Grippeepidemien. Influenzapandemien, also weltweite ▷

▷ Krankheitswellen mit Millionen Opfern, treten im Abstand von einigen Jahrzehnten auf – zuletzt 1957 und 1968. Jedoch waren diese beiden harmlos im Vergleich zur Influenza am Ende des Ersten Weltkriegs. Da die Grippeviren erst Anfang der 1930er Jahre beschrieben wurden, schien es lange aussichtslos, den verheerenden Erreger von 1918 jemals wieder zu finden.

Entgegen aller Erwartung gelang uns dies kürzlich. In Gewebeproben von Grippeopfern von damals fanden wir noch genügend genetisches Material, um die Eigenschaften jenes Virusstamms zu rekonstruieren. Das ermöglicht nun auch, einige grundsätzliche Fragen zur Genetik und den Merkmalen dieses speziellen Influenzavirus zu klären.



In mancher Hinsicht glich die Influenzaseuche von 1918 durchaus anderen Grippepandemien. Wahrscheinlich kann eine Influenza immer dann besonders um sich greifen, wenn eine lange nicht aufgetauchte oder sogar ganz neue Version des Erregers erscheint, mit dem die wenigsten Menschen jemals in Berührung gekommen sind. Dann besitzt kaum jemand spezifische Abwehrkräfte dagegen.

Die meisten Opfer unter jungen Menschen

Trotzdem war der Erreger von 1918/19 mit seiner Vehemenz und Ausbreitung ein besonderer Fall. Ein Drittel der Weltbevölkerung mag er erfasst haben. Er drang selbst in entlegene Gebiete Alaskas und bis zu abgelegenen pazifischen Inseln vor. Die Sterblichkeit lag mit 2,5 bis 5 Prozent bis zu fünfzigfach höher als sonst bei einer grassierenden Influenza.

Normalerweise sterben an einer Grippe hauptsächlich schwächere, chronisch kranke und ältere Menschen sowie auch kleine Kinder. Diesmal aber traf es besonders die 15- bis 35-Jährigen. Unter den über 65-Jährigen gab es nicht mehr Opfer als in gewöhnlichen Grippejahren. Wer die kritischen ersten Tage mit den charakteristischen Lungenödemen und Lungenblutungen überstand – die virale Pneumonie durch das Influenzavirus selbst –, erlag danach oft einer sekundären Lungenentzündung durch Bakterien, die jetzt leichtes Spiel hatten. Solche überlagernden Infekte forderten die meisten Toten. Antibiotika, das Mittel der Wahl gegen bakterielle Infektionen, kannte die Medizin damals noch nicht.

Als wir uns 1995 daranmachten, das Killervirus von 1918 wieder aufzuspüren, waren wir nicht die Ersten, die das unternahmen. Schon 1951 hatte der aus Schweden stammende spätere Pathologe Johan Hultin, damals Doktorand an der Universität von Iowa in Iowa City, zusammen mit Kollegen versucht, in einem Massengrab in Alaska eingefrorenes Lungengewebe zu finden, das noch Virusreste enthielt. Einst hatte die Grippewelle im November 1918 jenen kleinen Ort auf der Halbinsel Seward fast ausgelöscht. Binnen fünf Tagen waren dort 72 Menschen der Grippe erlegen. Der Permafrostboden hatte zwar die Leichen erhalten. Doch Hultins Bemühungen blieben – zumindest damals – vergeblich.

Dank neuerer Methoden und Forschungserfahrungen mit ähnlich heiklem Material hatten wir mehr Glück. Wir konnten auf Gewebeproben damaliger Grippeopfer zugreifen, die das US-Institut der Streitkräfte für Pathologie (AFIP) in Washington D.C. aufbewahrt hatte. Unsere erste Studie umfasste 78 Proben vom Herbst 1918. Weil das Influenzavirus in der Lunge erfahrungsgemäß meist nur in den ersten Tagen der Erkrankung nachweisbar ist, konzentrierten wir uns auf Grippeopfer, die binnen weniger Tage mit schweren, viral bedingten Lungensymptomen gestorben waren.

Bei diesen Untersuchungen mussten wir unser Verfahren bis an die Grenzen ausreizen. Damals hatten die Pathologen die Gewebe zunächst mit Formalin durchtränkt und dann in Paraffin eingebettet. Nach einem Jahr gelang es uns 1996 endlich, aus einer der Proben Bestandteile eines Grippevirus zu isolieren. Sie stammte aus der Lunge eines in Fort Jackson (South Carolina) verstorbenen Soldaten. Mit diesem bruchstückhaften Material konnten wir für fünf der viralen Gene Fragmente ihrer Nukleotidsequenzen – der Bausteinfolgen – bestimmen.

Wir benötigten aber mehr Daten, um abzusichern, dass wir genetische In-

IN KÜRZE

▶ Der **Spanischen Grippe** erlagen am Ende des Ersten Weltkriegs schätzungsweise 40, vielleicht bis zu 50 Millionen Menschen, deutlich mehr als bei anderen **Influenzapandemien** (globalen Epidemien). Ungewöhnlicherweise tötete das Virus hauptsächlich junge Erwachsene und Jugendliche.

▶ Mittels Gewebeproben damaliger Opfer gelang Forschern jetzt die **Rekonstruktion des Genoms jenes fatalen Virus**. Anhand der Gene ermitteln sie nun seine besonderen Merkmale und Eigenschaften.

▶ Noch ist die **Brutstätte** des außergewöhnlich aggressiven Erregers rätselhaft. Anscheinend entstammte er nicht den bekannten natürlichen Herden bei Vögeln und Säugetieren, sondern bildete sich in einem noch nicht aufgespürten Zwischenwirt zu einem beispiellosen Killer heran.

formation des 1918er Virus gewonnen hatten. 1997 wurden wir wiederum fündig. Die zweite Probe stammte von einem Soldaten, der seiner Grippe in Camp Upton im Staat New York erlegen war. Soweit ermittelbar, stimmten die genetischen Sequenzen überein. Allerdings hofften wir zu dem Zeitpunkt nicht mehr wirklich darauf, dass wir jemals das komplette Genom jenes Killervirus kennen lernen würden.

Da meldete sich unerwartet Johan Hultin bei uns. Der nun 73 Jahre alte Pathologe hatte von unseren Forschungen gelesen und bot uns an, nochmals aus den Permafrostgräbern von Alaska Proben beschaffen zu helfen. Die dortige Gemeinde genehmigte ihm die neuerliche Exhumierung des Massengrabs. Hultin nahm von vier der Toten gefrorenes Lungengewebe. Die Probe von einer Frau enthielt tatsächlich noch aufschlussreiche genetische Moleküle des Influenzavirus. Dank dieser RNA gelang es uns, das gesamte Genom des 1918er Stammes zu sequenzieren.

Virusgene nach 80 Jahren

In Zusammenarbeit mit britischen Kollegen konnten wir später weiteres Autopsiematerial von Grippepatienten untersuchen, die 1918 in England im Royal London Hospital verstorben waren. Daraus Virusgene zu sequenzieren gelang in zwei Fällen. Die Sequenzen waren mit denen aus den nordamerikanischen Isolaten fast identisch. Das zeigt eindrucksvoll, wie rasch sich das Virus damals über die Kontinente hinweg ausgebreitet haben muss.

Was aber lässt sich aus den genetischen Sequenzen über das 1918er Virus erfahren? Warum forderte es so viele Todesopfer? Und vor allem – woher war es gekommen? Um die bisherigen Ergebnisse hierzu zu verstehen, seien zunächst der Lebenszyklus von Grippeviren und ihr Verhalten in verschiedenen Wirtsorganismen erläutert (siehe auch Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 48).

Influenzaviren treten in drei Grundtypen auf: A, B und C genannt. Die Pandemien des letzten Jahrhunderts gingen alle auf Stämme des Typs A zurück. Während die Typen B und C offenbar nur den Menschen befallen und noch niemals Pandemien ausgelöst haben, infiziert der Typ A auch diverse Tiere, darunter Hühner, Schweine und Pferde. Wildenten und andere Wasservögel dürften sein natürliches Reservoir bilden. Alle der zahlreichen bekannten Subtypen von A kommen in ihrer Darmschleimhaut vor – in der Regel ohne dass die Wildvögel krank sind.

Fatalerweise vermögen sich diese Influenzaviren fortwährend zu verändern. Das erfolgt einerseits durch reguläre Mutationen, die durch Kopierfehler beim Vervielfältigen des viralen RNA-Genoms entstehen. Unter Umständen erkennt das Immunsystem von Menschen, die bereits eine Grippe mit einem ähnlichen Erreger durchgemacht haben, das Virus dann nur schwer oder gar nicht wieder.

Andererseits können völlig neue Stämme auftreten, wenn ein Austausch genetischen Materials zwischen verschiedenen Stämmen erfolgt. Dazu kann es kommen, wenn zwei unterschiedliche Virusstämme denselben Wirt infiziert haben und sich in seinen Zellen sozusagen mischen. Das Genom von Typ-A-Viren besteht aus acht gesonderten RNA-Segmenten, welche die Anweisungen für etwa zehn Proteine tragen. Die Segmente von zwei verschiedenen Virusstämmen verteilen sich bei dem Austausch ganz neu auf die gebildeten Viren (siehe Kasten S. 56/57).

Diese Eigenschaft des Influenza-A-Virus ist gefürchtet, denn so können Erreger entstehen, gegen die in der menschlichen Bevölkerung noch keine Immunität herrscht. Leicht droht nun eine Pandemie. Besonders warnen Epidemiologen vor neuen Stämmen, die Eigenschaften von Influenzaerregern vereinen, welche an ganz verschiedenartige Organismen angepasst waren. Dann kann es beispielsweise vorkommen, dass ein menschliches Influenzavirus plötzlich auch genetische Elemente eines ursprünglichen Vogelvirus trägt. Eben solche Viren waren wahrscheinlich manchmal Auslöser von Grippepandemien.

Von den viralen Eigenschaften des Typs A interessiert Mediziner vorrangig das Verhalten zweier seiner Oberflächenproteine: vom Hämagglutinin (HA) und von der Neuraminidase (NA). Ersteres ist dafür wichtig, dass das Virus die Zelle überhaupt infizieren kann. Mit Hilfe des Hämagglutinins bindet sich das Virus an Rezeptoren auf den Wirtszellen, in welche es dann eindringt. Bei Vögeln erkennt es spezifische Moleküle auf Zellen ▷

Die Spanische Grippe wütete auch unter der Zivilbevölkerung. Vielerorts erkrankte jeder dritte Einwohner, was oft – so in einigen deutschen Großstädten – den öffentlichen Betrieb lähmte. Diese Aufnahme, auf der Rot-Kreuz-Schwestern einen Kranken wegbringen, entstand 1918 in St. Louis (Missouri).



AMERIKANISCHES ROTKREUZ-MUSEUM

▷ von deren Darmschleimhaut, bei Säugern welche auf Epithelzellen der Atemwege. Das zweite Protein, die Neuraminidase, ist für die Virusverbreitung im Körper wichtig. Dieses Molekül hilft den massenhaft frisch synthetisierten Viren dabei, die erste Wirtszelle zu verlassen.

Von beiden Proteinen sind etliche Untertypen bekannt, gegen die Infizierte unterschiedliche Antikörper bilden: Von HA gibt es demnach mindestens 15, von NA neun Subtypen. Sie werden durchnummeriert, um danach die Viren zu klassifizieren. Die Zählung beginnt bei dem aggressiven Stamm von 1918. Er heißt folglich H1N1. Dies legten Forscher anhand von Antikörpern fest, die sie im Blut von Überlebenden jener Grippepandemie fanden. Sie wissen daher auch, dass weniger virulente Abkömmlinge der Kombination H1N1 bis Mitte der 1950er Jahre bei Grippewellen vorherrschten. Als dann 1957 beim Menschen eine andere Kombination auftauchte, H2N2 genannt, brach wieder eine Pandemie aus. Die Pandemie von 1968 wiederum ging auf die Kombination H3N2 zurück, die seitdem bei Grippewellen vorherrscht.

Noch heute Antikörper gegen die Spanische Grippe

Die Virusproteine HA und NA gehören auch zu den primären Angriffszielen der Immunabwehr. Wer eine Grippe überstanden hat, besitzt normalerweise Antikörper gegen den entsprechenden Virusstamm, die auch einigermaßen gegen Varianten vom selben Subtyp helfen. Spezifische Antikörper gegen jenes HA etwa würden die Rezeptorbindung blockieren und so eine Neuinfektion unterbinden. Die Abwehrkraft gegen denselben Stamm bleibt offenbar jahrzehntelang erhalten, ist allerdings gegen mutierte Stämme weniger ausgeprägt. So ergab kürzlich eine Studie, dass Personen, die der Pandemie von 1918 ausgesetzt waren, noch heute eine Menge Antikörper gegen dieses spezifische Virus besitzen.

Gegen andere HA-Subtypen sind die Betreffenden allerdings nicht gefeit. Wenn unter den menschlichen Grippeviren nun sogar ein ganz neuer HA-Subtyp auftaucht, trifft dieser in der Bevölkerung auf keine Antikörper und der Erreger könnte sich deswegen unter Umständen rasant ausbreiten. In Abständen geschieht das anscheinend immer wieder, wenn sich menschliche Influenzaviren mit welchen von Wildvögeln mischen, die ja einen großen Pool an HA-Subtypen beherbergen – und sich dann in einem Zwischenwirt, etwa in Hausschweinen, weiterentwickeln. Zwar sind die an Vögel angepassten Hämagglutinine normalerweise für uns direkt wenig gefährlich, weil sie die Oberflächenmoleküle unserer Atemwege nicht gut erkennen. Doch die jüngsten Ereignisse in Südostasien rund um die Vogelgrippe haben gezeigt, dass auch von ihnen durchaus eine unmittelbare Gefahr ausgehen kann.

Bisher glaubten Mediziner, die Vogelviren müssten sich stets erst mit schon an uns angepassten Viren vermischen – was etwa in Schweinen geschehen kann, die zugleich mit Menschen und Geflügel in Berührung kommen. Die Epidemiologen schlugen Alarm, als 1997 ein Vogelgrippevirus des Subtyps H5N1, der damals in Hühnerfarmen wütete, offenbar direkt auf Menschen übersprang. In Hongkong streckte der Erreger 18 Personen nieder, von denen sechs starben. Seit Ende 2003 grassiert dieser H5N1-Stamm in Ost- und Südostasien wieder in den Hühnerställen und ist offensicht-

Vermehrungsstrategie des Grippevirus

Der Influenzaerreger ist selbst für ein Virus ziemlich klein. Durch Ablesefehler beim Kopieren der wenigen Gene (unten) entstehen fortlaufend neue Varianten. Zudem können verschiedene Virusstämme sogar Gene austauschen (rechts).

Influenza-A-Virus

Das Influenzavirus vom Typ A besteht im Prinzip aus einer Hohlkugel, die acht Gensegmente umschließt. Seine wenigen Gene reichen aus, um einen Wirt für seine Vermehrung nutzen zu können.

HA

Lipid-Doppelmembran

Gensegmente

NA

WIRTSZELLE

Virus dringt in Wirtszelle ein

normale Neusynthese

Protein HA des Virus bindet sich an ein Molekül auf der Wirtszelle

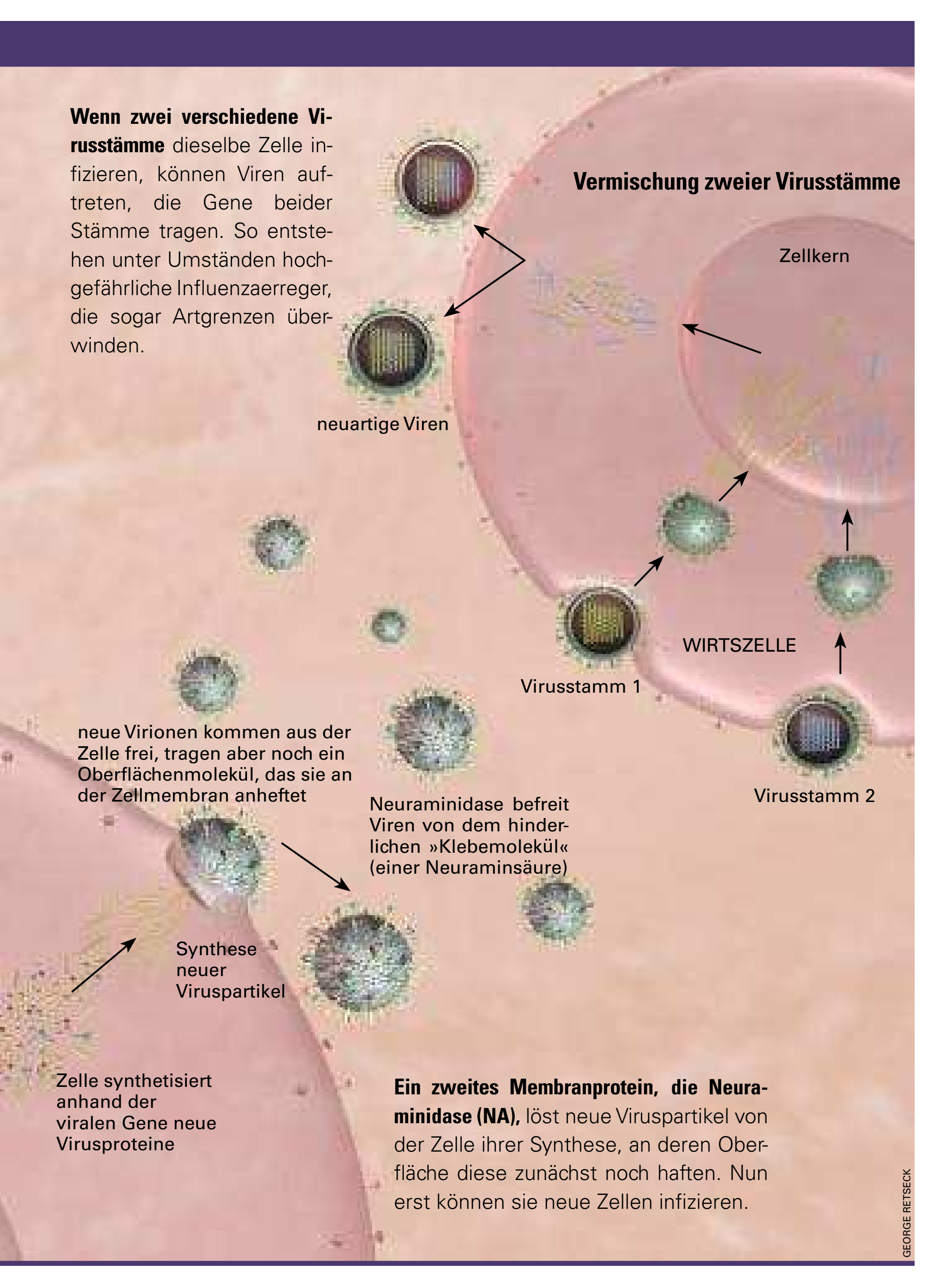
Virus setzt seine RNA-Gensegmente frei; die gelangen in den Zellkern

Mit Hilfe seines Oberflächenproteins Hämagglutinin (HA) verschafft sich das Virus Zutritt in Zellen. Deren Spezifität – und damit auch der mögliche Wirt – bestimmt sich durch Strukturunterschiede dieses Moleküls.

virale RNA

ZELLKERN

Vermehrung der viralen RNA



lich inzwischen noch aggressiver geworden. Auch Tiger in einem asiatischen Zoo, die mit Hühnern gefüttert wurden, verendeten. Deutlich über 50 durch H5N1 verursachte Erkrankungen beim Menschen in Vietnam, Thailand und neuerdings auch Kambodscha waren bis Ende Februar 2005 gesichert. Mehr als 40 dieser Personen sind schon daran gestorben.

Was noch alarmierender ist: Mindestens in einem Fall hat sich jemand offenbar an einer anderen Person angesteckt. Das kann bedeuten, dass dieses Virus ein Potenzial entwickelt, von Mensch zu Mensch übertragen zu werden. Die WHO und in Deutschland das Robert-Koch-Institut warnen darum ernstlich vor einer neuen Grippepandemie.

Die Gefährlichkeit, also Ansteckungskraft und toxisches Potenzial eines Grippeerregers – seine Virulenz – hängen unter anderem davon ab, wie leicht das Virus verschiedene Gewebe infiziert, wie schnell es sich vermehrt und wie heftig das Immunsystem auf den Eindringling reagiert und dadurch seinerseits Verwüstungen anrichtet. Würden wir die entscheidenden molekularen Eigenschaften des Grippevirus von 1918 kennen, könnten wir auch besser die Gefahr abschätzen, die von heutigen Stämmen ausgeht.

Zunächst nahmen wir die Struktur einzelner Bestandteile des Killervirus von damals in Augenschein. Solche Moleküle konnten wir anhand der ermittelten Gensequenzen synthetisieren. Wir ließen so das Virus gewissermaßen in Bruchstücken wieder auferstehen. Als Erstes nahmen wir das Hämagglutinin (HA) in Augenschein – das Molekül, mit dem sich das Grippevirus an die Zellen bindet, die es dann infiziert.

Nur ein minimaler Unterschied

Wir entdeckten, dass beim 1918er Virus die Bindungsstelle des HA fast genauso aussah wie beim jetzt gefährlichen vogelspezifischen H5-Subtyp (siehe Bild auf S. 60). Bei zwei der Isolate von 1918 unterschied sich das Molekül nur in einer einzigen Aminosäure. Bei den drei anderen war noch eine zweite Aminosäure verändert. Vielleicht genügt so wenig schon, um das Vogelvirus für den Menschen infektiös zu machen.

Die Schwere der Infektionen damals, den raschen Krankheitsverlauf und die hohe Todesrate erklärt das allerdings noch nicht unbedingt. Darum suchten wir als Nächstes nach spezifischen Mutationen an den viralen Genen, welche eine Steigerung der Virulenz bewirkt haben könnten. Wir forschten beispielsweise nach zwei bekannten Abweichungen, von denen wir wussten, dass manche Grippeviren dadurch hochvirulent werden. Im einen Fall betrifft es wiederum das HA. Dieses Molekül wird normalerweise im Vogeldarm von einem dort vorhandenen Enzym (einer speziellen Protease) in zwei Teile zerschnitten. Erst dann kann das HA dem Virus helfen, eine Zelle zu infizieren.

Manche H5- und H7-Untertypen bei Vögeln tragen aber an der Schnittstelle eine oder mehrere Aminosäuren zusätzlich. Die Folge ist, dass nun alle möglichen Proteasen dieses HA aktivieren können. Ein solches Virus vermag bei Vögeln auch andere Organe zu befallen, sogar das Zentralnervensystem, und die Sterberate ist sehr hoch. Auch bei den derzeit in Asien kursierenden H5N1-Viren, die ganze Hühnerzuchten dahinraffen, ist diese Mutation nachgewiesen. Bei den Isolaten von 1918 fanden wir die Veränderung allerdings nicht. Somit schied dieser Verdacht aus. ▷

Die zweite Mutation, der wir nachgingen, betrifft die Neuraminidase (NA). Diese ebenfalls potenziell gefährliche Abweichung ist bei zwei Virusstämmen belegt, welche Mäuse infizieren. Labormäuse sterben dann in der Regel. Auch hier ermöglicht anscheinend der Austausch eines einzigen Bausteins, dass sich das Virus in einer Reihe von verschiedenen Geweben vermehrt. Aber selbst diese Mutation war in den Virusgenen aus den Gewebeproben von 1918 nicht nachweisbar.

Nun versuchten wir einen anderen Ansatz (siehe Kasten unten). In Zusammenarbeit mit mehreren Forscherteams erzeugten wir kombinierte Viren, die einzelne oder mehrere – immer wieder andere und bis zu fünf – Erbsegmente des Killervirus von 1918 enthielten, ansonsten aber die Gene etwa eines heutigen Mäusevirusstamms. Die hybriden Viren konfrontierten wir zum Beispiel mit Kulturen aus menschlichen Zellen oder infizierten damit Versuchstiere. Dieses Verfahren war endlich aufschlussreicher. Normalerweise verfügen Zellen bei einer Virusinfektion über ein Frühwarnsystem an die Immunabwehr: Sie lösen mit einer bestimmten Sorte von Interferonen einen schnellen Alarm aus – was oft das Schlimmste verhindert.

Unterdrückte Immunabwehr

An dem Erreger von 1918 war auffallend, wie rasch er sich in den oberen und unteren Atemwegen ausbreitete und in den Geweben schwersten Schaden anrichtete. Demnach vermochte er sich rasend schnell zu vermehren und zu verteilen – als wäre er auf keine Gegenwehr gestoßen. Hatte das Virus das Frühwarnsystem außer Gefecht gesetzt? Ein Effekt mit dieser Tendenz ist vom Protein NS1 des Influenzavirus bekannt. Wie wir zeigen konnten, vermochte tatsächlich ein zusammengesetztes Grippevirus mit dem NS1-Gen von 1918 den frühen Alarm im Körper deutlich effektiver zu unterdrücken, als aktuell kursierende Grippeviren dies ohnehin tun.

Auch die schon mehrfach erwähnten Proteine HA und NA dürften zur Gefährlichkeit des Virus beigetragen haben. Bei Mäusen verliefen Infektionen mit neu kombinierten Viren tödlich, wenn diese Erreger für beide Proteine die Gene von 1918 trugen. Die schweren Lungenschäden, die damit auftraten, erinnerten an die mancher der damaligen Todesopfer. Wir fanden im Muster der Genaktivierung auch Anzeichen für eine ausgeprägte zerstörerische Entzündungsreaktion des Immunsystems.

Vor Kurzem berichtete Yoshihiro Kawaoka von der Universität von Wisconsin in Madison von ähnlichen Experimenten mit gleichem Ergebnis. Bei Tests mit konstruierten Viren, die von 1918 entweder das HA- oder das NA-Gen enthielten, ergab sich allerdings, dass nur das Hämagglutinin des Killervirus die

Neue Viren aus dem Labor

Um die Eigenschaften des Virus der Spanischen Grippe zu beobachten, stellten wir Viren her, die bis zu fünf Gensegmente (sprich Gene) des Erregers von 1918 enthielten. Hierfür arbeiteten wir mit einer Reihe von Wissenschaftseinrichtungen und Behörden zusammen. Das Verhalten der neu geschaffenen Erreger testeten wir an Versuchstieren und an menschlichen Zellkulturen.

Das angewandte Verfahren heißt plasmidbasierte reverse Genetik. Dazu wurden die viralen Gene – die aus RNA bestehen – zunächst in DNA umkopiert. Die DNA-Sequenzen brachten wir in Plasmide ein, ringförmige DNAs aus Bakterien. Jeweils eine Auswahl an solchen Plasmiden injizierten wir dann in lebende Zellen. So erzeugten wir gezielt neue Viren, die einzelne oder mehrere genetische Instruktionen des Killervirus von 1918 enthielten.

Andere Forschungsteams wollen mit diesem Verfahren feststellen, wie groß die Epidemiegefahr für den Menschen ist, die von dem gegenwärtig in zehn Staaten Ost- und Südostasiens unter Vögeln grassierenden Vogelgrippevirus des Subtyps H5N1 ausgeht. Die Wissenschaftler kombinieren Gene von H5N1 mit welchen aktuell kursierenden Humaninfluenzaviren. Ein Zweck ist herauszufinden, ob dieser Erreger der Vogelgrippe bald so weit verändert sein könnte, dass Menschen ihn untereinander weitertragen. Es ist wichtig zu wissen, wie wahrscheinlich solche gefürchteten Varianten spontan auftreten und wie virulent sie für den Menschen wären.

Diese Virusexperimente finden in speziellen Hochsicherheitslabors statt. Damit will man nicht nur erkennen, wieso Influenzaviren immer wieder für Pandemien sorgen. Für den Stamm von 1918 ergab sich außerdem, dass verfügbare antivirale Medikamente wie Amantadin und auch die Neuraminidasehemmer in der Frühphase der Infektion therapeutisch wirksam wären. Die H5N1-Viren sind ebenfalls gegen Neuraminidasehemmer empfindlich.

Wissenschaftler aus den USA und Großbritannien haben mit den gleichen Methoden wie hier beschrieben mit Vogelvirusgenen einen relativ »sanften« Virusstamm konstruiert, der nun zur Herstellung eines Humanimpfstoffs gegen H5N1-Viren dienen soll. Die gefährlichsten Merkmale des H5N1-Wildtyps entfernten sie zu dem Zweck.

Kopien der viralen Gensegmente (rot: Segmente des Killervirus, die untersucht werden sollen)

Plasmide

Zellkultur

neu kombiniertes Virus

GEORGE RETSECK

So wurden Grippeviren mit maßgeschneiderten Eigenschaften neu konstruiert. Die Methode bringt Gene zweier Virusstämme zusammen (rot und blau).

vehemente Immunreaktion auslöst. Für die Virulenz des 1918er Virus muss somit eben dieses Protein eine Schlüsselrolle gespielt haben – welche auch immer.

Untersucht werden soll jetzt, wie die zur Zeit in Asien kursierenden hochgradig lebensbedrohlichen H5N1-Vogelinfluenzaviren sich verändern müssten, damit sie das Potenzial bekämen, leicht von Mensch zu Mensch zu wandern und eine Pandemie auszulösen. Ebenso dringlich sollten wir herausfinden, unter welchen Umständen ein so aggressives Virus entsteht. Man müsste vor allem wissen, welche früheren Wirte daran beteiligt waren. Woher stammten die einzelnen Gene? Über solche Fragen können Mutationsmuster in den Gensequenzen Aufschluss bringen, aus denen sich regelrechte Stammbäume aufstellen lassen. Weil sich die acht RNA-Segmente von Influenza-A-Viren unabhängig voneinander neu sortieren, erstellen wir für jedes Segment einen eigenen hypothetischen Stammbaum ihrer Evolution.

Indizien für die Geschichte eines ungewöhnlichen Virus

Für fünf der Gensegmente liegt nun ein Ergebnis vor. Bisher sieht es durchweg so als, als gehörte das 1918er Virus nicht zu den Vogelviren, sondern zu den menschlichen und den Schweineviren. Mit Vogelviren hatte es allerdings durchaus einiges gemeinsam – was vermuten lässt, dass der Erreger ursprünglich aus einem Vogelreservoir stammte. Er scheint aber schon längere Zeit vorher auf Säugetiere übergegangen zu sein. Bis 1918 hatte er dann offenbar genug Anpassungen an die neue Wirtsgruppe erworben, um für Menschen hochinfektiös zu sein und eine Pandemie auszulösen. Wo mag diese Entwicklung stattgefunden haben?

Nehmen wir als Beispiel das Gen für Hämagglutinin (siehe Kasten rechts). Ein Vergleich der RNA-Sequenzen verschiedenster Virusstämme ergab: Der genetische Abstand von dem HA von 1918 (Subtyp H1) zu den heute bei Vögeln bekannten H1-Versionen ist deutlich größer, als dies bei den Pandemien von 1957 und 1968 für die Subtypen H2 beziehungsweise H3 der Fall war. Das könnte zweierlei bedeuten: Entweder hatte das HA-Gen von 1918 tatsächlich lange bei einem Zwischenwirt verweilt und Zeit gehabt, viele Mutationen anzuhäufen, die es sozusagen für den Menschen scharf machten; oder das entsprechende Gen stammte doch direkt von Vögeln, allerdings von einem Virus mit einer den Forschern bisher unbekannten H1-Version, die damals in Nordamerika vorkam.

Hiernach suchten wir nun in Sammlungen alter Vogelpräparate, wobei Mitarbeiter vom Naturhistorischen Museum der Smithsonian Institution in Washington und von der Ohio State University in Columbus mitarbeiteten. Es gelang uns schließlich, aus einer Wildgans, die 1917 in Alkohol gelegt worden war, einen Virusstamm des HA-Subtyps H1 zu isolieren. Doch die Analyse von dessen Hämagglutinin-Gen ergab eine enge Verwandtschaft mit heutigen H1-Versionen bei nordamerikanischen Vögeln. Vielleicht stoßen wir eines Tages auf eine Vogelversion, die der des menschlichen Virus von 1918 mehr ähnelt. Ob es die jemals gab, ist aber nicht sicher.

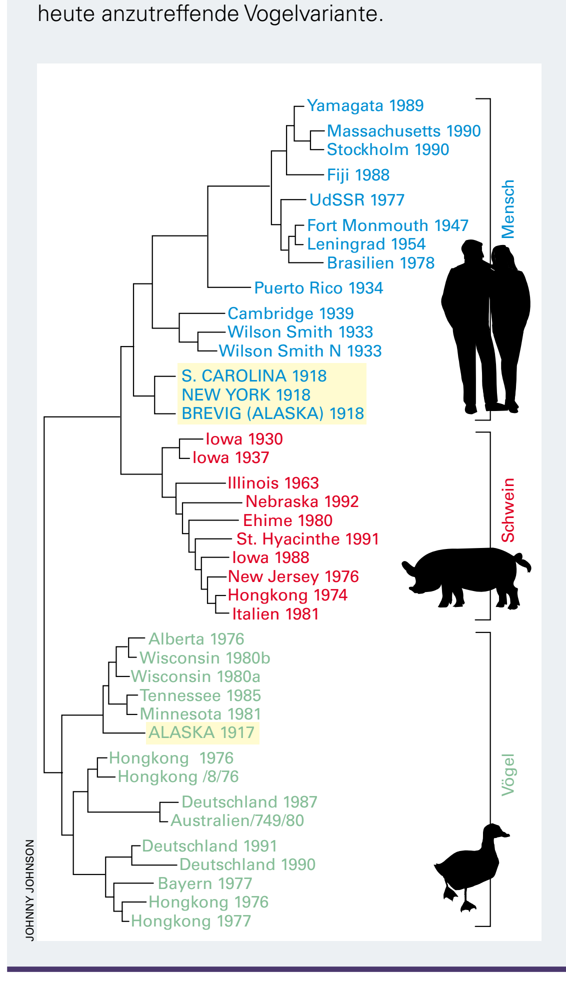
Andernfalls muss ein Zwischenwirt existiert haben. Normalerweise kommen dafür besonders Schweine in Frage, denn sie sind mit menschlichen wie auch mit Vogelinfluenzaviren infizierbar. Tatsächlich gab es 1918 gleichzeitig auch bei Schweinen Influenzaausbrüche. Doch wir glauben, dass damals Menschen ihre Haustiere ansteckten und nicht umgekehrt. In späteren Jahrzehnten geschah das recht oft, umgekehrt selten. Schweine waren zu dieser Zeit allen Anzeichen nach vorher wohl nicht Zwischenwirt gewesen. Wie es aussieht, war das 1918er Virus dann aber Vorläufer von späteren H1N1-Linien bei Mensch und Schwein.

Wir schauten uns ein H1N1-Vogelinfluenzavirus an, das sich in den letzten 25 Jahren an europäische Schweine adaptiert hat. Trotz der relativ langen Zeitspanne unterscheidet sich dieses Hämagglutinin-Gen immer noch weniger von dem der Vögel als das menschliche von 1918. Ähnliche Resultate brachte die Prüfung von vier weiteren der 1918er Gene. Deswegen vermuten wir, dass sich das Virus von damals länger in einem noch nicht bekannten Zwischenwirt veränderte – abseits vom Genpool von Wassergeflügel, auch wenn es vielleicht ursprünglich von Vögeln stammte. Das erinnert an die Situation, als vor Kurzem ein Coronavirus unbekannter Herkunft, das plötzlich in Südostasien auftauchte, durch die Lungenkrankheit Sars weltweit Schrecken verbreitete. Auch dieser Erreger stammte aus einem Tierreservoir, das wir nicht sicher kennen.

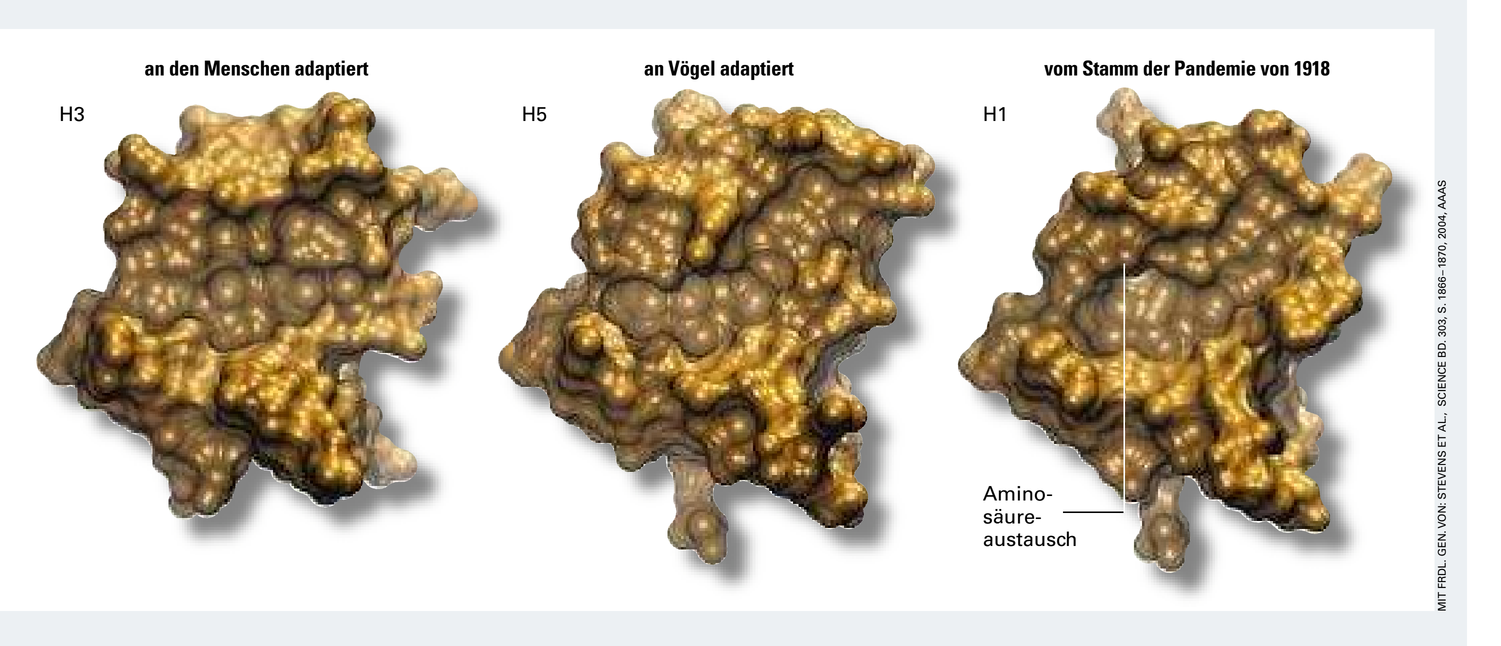
Künftig möchten wir nach den unmittelbaren Vorläufern des Grippevirus von 1918 forschen. Wir hoffen auch, ▷

Stammbaum eines Gens

Die Herkunft des Hämagglutinins (HA) des Virus von 1918 wurde durch Vergleich seiner Gensequenz mit denen anderer Influenzastämme ermittelt, die zum gleichen Subtyp H1 gehören. Daraus ergab sich der hier dargestellte hypothetische Stammbaum. Man erkennt, dass das HA von 1918 zur Familie humanadaptierter H1-Grippeviren passt. Mit dem entsprechenden HA von Vögeln war es nicht nah verwandt. Wie es aussieht, stammte dieses Gen dennoch ursprünglich von einem Vogelvirus ab. Doch in jedem Fall müsste es später eine längere Entwicklung in einem noch unbekannten anderen Wirt durchgemacht haben. Zumindest trug eine Wildgans, die 1917 in Alaska starb, nicht jene, sondern eine noch heute anzutreffende Vogelvariante.



Kleine Mutation mit großer Wirkung



Grippeviren binden sich mit ihrem Oberflächenprotein Hämagglutinin (HA) an Zellen, die sie dann infizieren. Diese Ansichten dreier Varianten des Moleküls zeigen die Bindungsstelle (jeweils in der Mitte). Das Protein vom Subtyp H3 (links) erkennt unter anderem mit seiner breiten Vertiefung ein Molekül im Atemtrakt des Menschen; das vom Subtyp H5 (Mitte) mit einer engeren Höhlung kann sich im Darm von Vögeln anlagern.

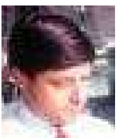
Das Hämagglutinin, welches der Subtyp H1 des Killervirus von 1918 trug (rechts), ähnelte in diesem Merkmal eigentlich stärker dem in der Mitte gezeigten Molekül des genannten Vogelgrippevirus. Jedoch war die zentrale Vertiefung infolge einer Mutation weiter ausgebildet – was offensichtlich dazu ausreichte, dass der neue Virusstamm etwa 40, wenn nicht 50 Millionen Menschen umbrachte.

▷ noch Gewebeproben von Menschen zu finden, die der ersten Welle im Frühjahr 1918 erlagen, als das Virus noch nicht seine volle Ansteckungskraft und Aggressivität erlangt hatte. Dann ließe sich vielleicht erkennen, weswegen daraus bis zum Herbst ein noch gefährlicherer Stamm wurde. Könnten wir außerdem Spuren der Grippeerreger entdecken, die in den vorausgegangenen Jahrzehnten kursierten, wäre hoffentlich erklärbar, warum 1918 hauptsächlich ausgerechnet jüngere Personen starben. Womöglich enthielt das fatale Virus außer einigen für den Menschen völlig neuen Elementen andere, zu denen ältere Personen schon einmal Kontakt gehabt hatten. Interessant wäre auch zu erfahren, wie sich das Virus in den Jahren nach dem Krieg veränderte, als es zwar weiter grassierte, aber viel von seiner Aggressivität verlor. Hierzu suchen wir nach Gewebeproben von 1920 und später.

Dem Killervirus von 1918 auf die Schliche zu kommen, wäre wichtig. Es scheint anderen Ursprungs gewesen zu sein als die Erreger der Grippepandemien von 1957 und 1968, die jeweils HA-Proteine ähnlich denen von Vogelviren besaßen. Diese beiden Stämme entstanden vermutlich, indem sich menschliche und Vogelviren mischten. Genaueres konnten Forscher darüber leider bisher nicht herausfinden. Deswegen wissen wir auch nicht, wie lange es in beiden Fällen dauerte, bis die neu kombinierten Viren das Potenzial zur pandemischen Ausbreitung erworben hatten.

Noch ist die Herkunft des 1918er Virus rätselhaft. Möglicherweise hatte dieser Killer neue Gene auf andere Weise und über andere Wege erworben als die späteren Pandemiestämme. Ein andersartiger Ursprung würde vielleicht seine außergewöhnliche Aggressivität erklären. Unbedingt sollten wir aber mehr Vogelviren genauer untersuchen sowie neben Schweinen andere potenzielle Zwischenwirte gründlich erforschen, also etwa Zuchtgeflügel, Wildvögel und Pferde. Sonst überrascht uns vielleicht plötzlich wie am Ende des Ersten Weltkriegs ein Grippevirus, dem wir nichts entgegensetzen können. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Jeffery K. Taubenberger, Ann H. Reid und **Thomas G. Fanning** (von links) sind Wissenschaftler am Institut für Pathologie der US-Streitkräfte in Rockville (Maryland). In diesem Artikel geben sie ihre eigene Auffassung wieder, nicht die Position des genannten Instituts oder des amerikanischen Verteidigungsministeriums.

Die siegreiche Strategie des Grippevirus. Von R. G. Webster und E. J. Walker in: Spektrum der Wissenschaft 8/2003, S. 48

Global host immune response: Pathogenesis and transcriptional profiling of type A influenza viruses expressing the hemagglutinin and neuraminidase genes from the 1918 pandemic virus. Von J. C. Kash et al. in: Journal of Virology, Bd. 78, Heft 17, S. 9499, Sept. 2004

The origin of the 1918 pandemic influenza virus: A continuing enigma. Von A. H. Reid und J. K. Taubenberger in: Journal of General Virology, Bd. 84, Teil 9, S. 2285, Sept. 2003

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Relativität, Kosmologie und Gravitationswellen

Was war an Einsteins Spezieller und Allgemeiner Relativitätstheorie eigentlich so revolutionär? Wo steht die Gravitationsforschung hundert Jahre nach dem »Wunderjahr« 1905? Bernard Schutz, Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam, unternimmt im Gespräch eine Zeitreise der besonderen Art.

Spektrum der Wissenschaft: Herr Schutz, zwei der fünf Arbeiten, die Albert Einstein 1905 in den »Annalen der Physik« veröffentlichte, betrafen die Grundzüge der Speziellen Relativitätstheorie. Was war daran das bahnbrechend Neue?

Bernard Schutz: Einstein hat mit diesen beiden Arbeiten unsere Vorstellungen, was wir unter Raum, Zeit und Bewegung zu verstehen haben, auf eine völlig neue Basis gestellt. Zuvor galt die Mechanik Newtons: Raum und Zeit waren darin universelle Strukturen. 1905 kam Einstein und sagte: Raum und Zeit sind nicht universell, sondern hängen vom Zustand des Beobachters ab.

Um das zu zeigen, genügten ihm zwei Postulate. Erstens die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Sie ist unabhängig von der Bewegung des Beobachters oder der Bewegung der Lichtquelle. Zweitens das Relativitätsprinzip: Die physikalischen Gesetze sind vom Bezugssystem unabhängig. Das waren grundlegend neue Gedanken. Auch unser Verständnis von Masse definierte er neu. In den »Annalen der Physik« legte er auf nur drei Seiten dar, dass sich Masse in Energie umwandeln kann und umgekehrt.

Spektrum: So wie Isaac Newton im 17. Jahrhundert die Physik auf ein begrifflich und mathematisch tragfähiges Fundament gestellt hatte, so entwarf Einstein jetzt eine neuartige Physik?

Schutz: Einstein erweiterte das klassische Weltbild in wesentlichen Punkten. Die Mechanik Newtons liefert ja eine hervorragende Beschreibung unserer Alltagswelt – sprich: solange wir uns nur mit kleinen Geschwindigkeiten bewegen. Sobald wir Phänomene betrachten, in denen sich die Geschwindigkeit derjenigen des Lichts annähert, versagt die klassische Beschreibung, und wir müssen Einsteins Relativitätstheorie anwenden.

Dazu müssen wir uns auch von vertrauten Begriffen lösen: Dreidimensionaler Raum und eindimensionale Zeit verschmelzen zu einem völlig neuen Begriff, der vierdimensionalen Raumzeit. Das heißt aber nicht, dass Newton falsch lag: Seine Mechanik ist eine sehr gute Näherung an die Einstein'sche Theorie. Aber diese umfasst eben auch Phänomene, die sich mit der klassischen Theorie von Newton nicht erklären lassen.

Spektrum: So seltsame Phänomene wie Längenkontraktion und Zeitdilatation …

Schutz: Genau. Je mehr sich die Geschwindigkeit den 300 000 Kilometer pro Sekunde, mit denen sich Licht fortpflanzt, annähert, desto seltsamer erscheint uns die Welt: Längen werden gestaucht, Zeiten gedehnt und Massen vergrößert.

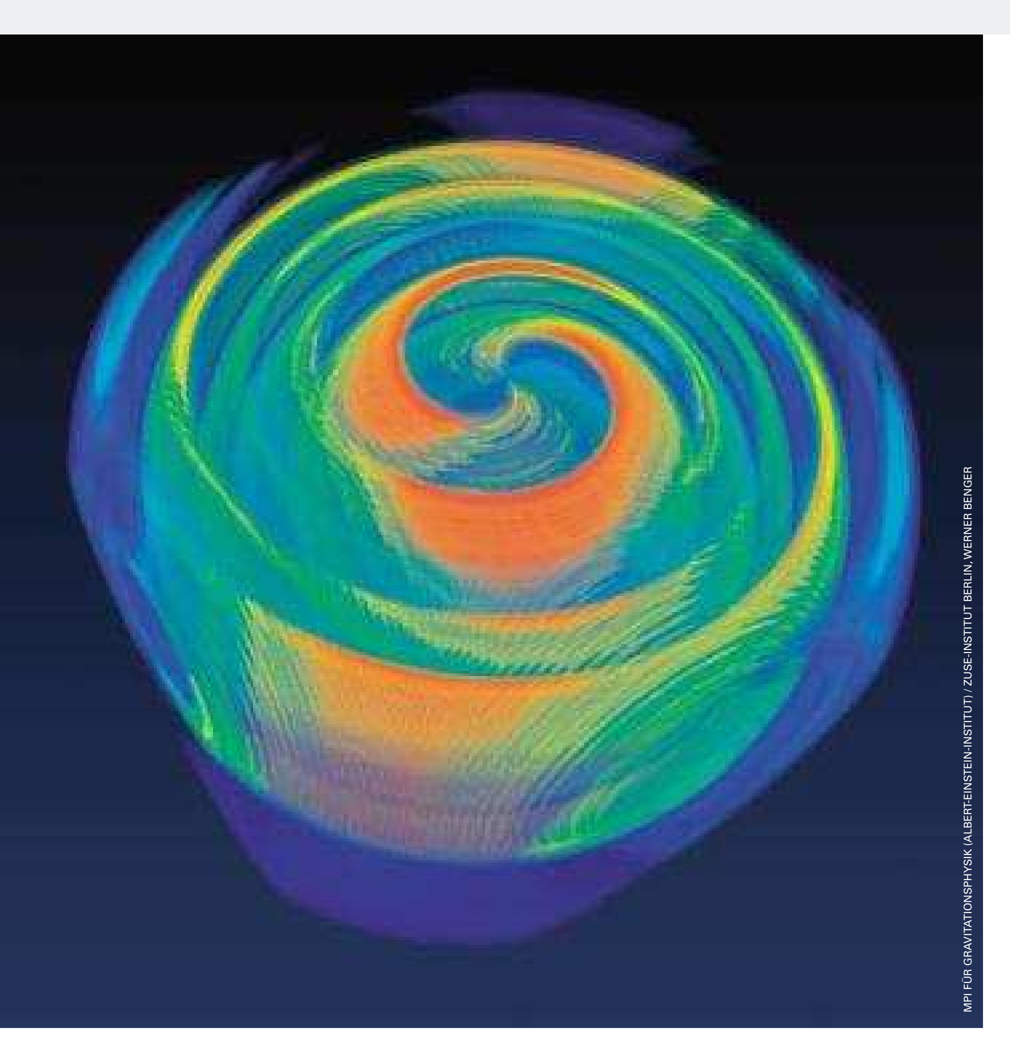
Spektrum: Wie macht sich das praktisch bemerkbar?

Schutz: Für die Zeitdilatation haben Physiker sehr früh Beispiele gefunden. Wenn instabile Elementarteilchen wie Pionen oder Myonen in Beschleunigern auf sehr hohe Geschwindigkeiten in der Nähe der Lichtgeschwindigkeit beschleunigt werden, vergrößert sich ihre Lebensdauer – sie können viel öfter im Beschleunigerring umlaufen, bevor sie zerfallen.

Spektrum: Und dieser Effekt ist sehr genau messbar?

Schutz: Die Experimente stimmen präzise mit den Vorhersagen der Theorie überein. Die Längenkontraktion hingegen ist ein Effekt, der sich nur indirekt messen lässt.





Wenn zwei Schwarze Löcher miteinander verschmelzen, gleicht das einem Beben der Raumzeit. Die entstehenden Gravitationswellen breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus. Die hier gezeigte Computersimulation stammt vom Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und dem Zuse-Institut in Berlin.

Spektrum: Auch in den großen Teilchenbeschleunigern?

Schutz: Ja. Ein Beispiel dafür wäre ein Gold-Atomkern, der im Teilchenbeschleuniger RHIC in Brookhaven im US-Bundesstaat New York fast auf Lichtgeschwindigkeit beschleunigt wird. Während er in Ruhe eher kugelförmig ist, wird er jetzt in Bewegungsrichtung stark verkürzt, nimmt also die Gestalt eines Ellipsoids an.

Die relativistische Vergrößerung der Masse hingegen ist in solchen Experimenten nicht nur messbar, sie muss bereits beim Bau der Teilchenbeschleuniger berücksichtigt werden. Diese Maschinen müssen nämlich so konstruiert sein, dass die jeweils richtige Kraft auf die Partikel ausgeübt wird, um sie auf ihrer Bahn zu halten. Dazu muss man die relativistische Masse der Teilchen kennen, die in der Anlage beschleunigt werden – beispielsweise Protonen.

Spektrum: Können Sie die zweite, sehr kurze Arbeit Einsteins aus dem Jahr 1905 über Spezielle Relativität kommentieren? Deren berühmtes Ergebnis war ja die Äquivalenz von Masse und Energie, die später in der berühmten Formel $E = mc^2$ ausgedrückt wurde.

Schutz: Einstein selbst war sich offenbar noch nicht ganz sicher, ob je ein Test der Energie-Masse-Äquivalenz möglich sein würde. In seiner Veröffentlichung hielt er es zumindest für »nicht ausgeschlossen«. Praktische Bedeutung hat diese Äquivalenz erst Jahrzehnte später gefunden: in der Energiegewinnung aus Kernenergie. Doch genaue Tests der Einstein'schen Vorhersage ermöglicht wiederum nur die Teilchenphysik.

Klarheit brachte hier der so genannte Betazerfall des Neutrons: Ein Neutron im Kern eines Atoms wandelt sich in ein Proton um, wobei aus dem Kern ein Elektron ausgestoßen wird. Da die Bewegungsenergie dieses Elektrons in den Messungen über eine recht große Spanne variierte, dachten die Physiker zunächst, der Energieerhaltungssatz sei verletzt. Das Rätsel löste schließlich 1930 Wolfgang Pauli. Er postulierte ein neues Teilchen, das Neutrino, das ebenfalls vom Kern emittiert werden und die fehlende Energie davontragen sollte. Dieses Neutrino wurde später tatsächlich nachgewiesen. Auch bei sehr vielen Reaktionen zwischen Elementarteilchen in Beschleunigern entstehen aus Bewegungsenergie neue Teilchen, und es gilt exakt die Einstein'sche Relation $E = mc^2$.

Spektrum: Auch nach dem »Wunderjahr« 1905 hat Einstein weitere revolutionäre Beiträge zur Physik geleistet …

Schutz: Ja. Einstein blieb weiter sehr kreativ. Im Jahr 1907 erkannte er die Bedeutung der Äquivalenz von träger und schwerer Masse und auch die Möglichkeit, die Rotverschiebung von Licht im Gravitationsfeld zu bestimmen. Dass die Lichtablenkung in starken Gravitationsfeldern messbar sein sollte, hat er 1909 beschrieben. Bevor dieser Effekt gemessen werden konnte, legte Einstein 1916 vielleicht seine kühnste Theorie, seine vollständige Arbeit über die Allgemeine Relativitätstheorie vor. Darin beschrieb er, dass die Lichtablenkung nicht nur von der Äquivalenz von schwerer und träger Masse herrührt. Vielmehr ist sie auch eine direkte Folge von der Krümmung des Raums, die durch Anwesenheit großer Massen hervorgerufen wird.

Spektrum: Also erneut eine Erweiterung des Newton'schen Weltbilds …

Schutz: Ja. Einstein legte mit der Allgemeinen Relativitätstheorie eine völlig neue Theorie der Gravitation vor. Während Newton die Gravitation als instantane, also verzögerungsfreie Kraft zwischen Massen beschrieb, definierte Einstein sie als Folge der Krümmung von Raum und Zeit.

Spektrum: Wie ließ sich denn diese neue Sichtweise überprüfen?

Schutz: Für Einstein war der erste Test die so genannte Periheldrehung des Merkurs. Die Bahnebene dieses Planeten verschiebt sich im Lauf der Zeit unter dem Schwerkrafteinfluss der anderen Körper im Sonnensystem. Der Winkel, um den sich der sonnennächste Punkt der elliptischen Bahn, das Perihel, in der Bewe- ▷



MPI FÜR GRAVITATIONSPHYSIK / NORBERT MICHALKE

Bernard Schutz ist Direktor am Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) in Potsdam-Golm.

gungsrichtung des Merkurs weiterdreht, ist mit der Newton'schen Gravitationstheorie nur teilweise zu erklären – es bleibt ein kleines Defizit. Einstein konnte bereits aus einer vorläufigen Form seiner späteren Feldgleichungen die korrekte Periheldrehung berechnen. Dass er das Defizit in seiner Theorie ohne freie Parameter erklären konnte, war für ihn die entscheidende Bestätigung.

Spektrum: Wichtiger noch als die Lichtablenkung?

Schutz: Die war zu diesem Zeitpunkt noch nicht gemessen. Die Erklärung der Periheldrehung allein war für die große Menge der Physiker nicht überzeugend genug. Sie wollten weitere Beweise – und die glückten kurz nach Ende des Ersten Weltkriegs. Mit Hilfe einer Sonnenfinsternis 1919 gelang es zwei Expeditionen, die Lichtablenkung im Schwerefeld der Sonne zu messen. Bis heute ist kontrovers, ob diese Beobachtungen wirklich die notwendige Genauigkeit hatten – aber sie bestätigten die Vorhersage Einsteins hinsichtlich der Krümmung des Raums, und das hat ihn mit einem Schlag weltbekannt gemacht.

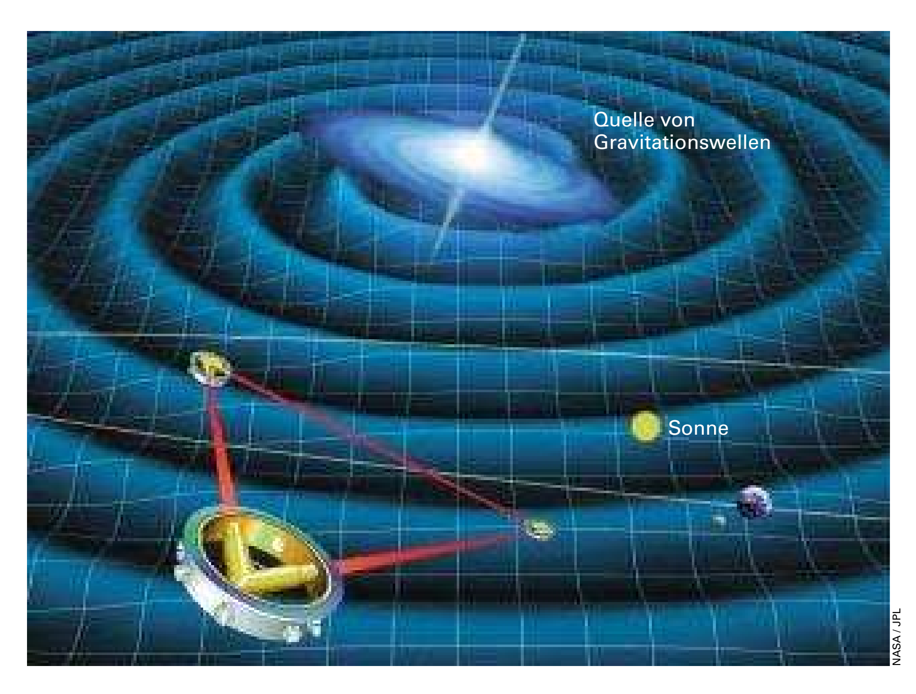
Fast alle Physiker hatten danach Einsteins Theorie akzeptiert. Es gab zwar bis in die 1970er Jahre hinein eine Anzahl von alternativen, teilweise nur wenig verschiedenen Theorien. Doch bis dahin hatte sich die Technik so weit fortentwickelt, dass beispielsweise Satellitenbahnen oder die Ablenkung der Radiostrahlung von Quasaren in Gravitationsfeldern sehr genau vermessen werden konnten. All diese Experimente haben die Allgemeine Relativitätstheorie so präzise bestätigt, dass es heute sehr schwierig geworden ist, alternative Theorien zu finden.

Spektrum: Die Relativitätstheorie macht auch Voraussagen zur Rotverschiebung von Spektrallinien in Gravitationsfeldern.

Schutz: Dies war eine sehr wichtige Vorhersage. Hier in Potsdam ist der Einstein-Turm ursprünglich eigens für diese Messung gebaut worden. Leider konnte der Effekt mit der damaligen Messtechnik noch nicht nachgewiesen werden. Heute hat man ihn jedoch bei der Sonne und vielen anderen Sternen sehr genau gemessen, und man findet die Voraussage der Allgemeinen Relativitätstheorie bestens bestätigt. Das ist übrigens auch der Fall beim Satelliten-Navigationssystem GPS, wo Zeiten auf der Erde und in den Satelliten unter Berücksichtigung der relativistischen Effekte genau bestimmt werden müssen – das ist gewissermaßen ein »anderes Gesicht« der Gravitations-Rotverschiebung. Um »im Takt« zu bleiben, müssen die Satelliten ihre Zeit relativistisch korrigieren, sonst würde die Navigation ungenau werden.

Spektrum: Im Jahr 1916 erschien ferner Einsteins erste Arbeit über Gravitationswellen. Halten Sie es für sicher, dass die Beschleunigung großer Massen solche wellenartigen Erschütterungen der Raumzeit verursacht?

Schutz: Aus theoretischen Gründen ist es unvorstellbar, dass es keine Gravitationswellen gibt. Die Frage ist, ob sie für den experimentellen Nachweis stark genug sind. Russell Hulse und Joseph Taylor haben 1993 den Physik-Nobelpreis für die Entdeckung und genaue Messung eines Pulsars in einem Doppelsternsystem bekommen. Sie konnten die Abnahme der Bahnperiode in über 30 Jahre dauernden Messungen nachweisen. Ihr Ergebnis passt innerhalb von 0,5 Prozent genau zur Einstein'schen Voraussage über die Abstrahlung von Gravitationswellen. Und, ganz wichtig, es gibt dabei keine freien Parameter: Man hat sehr präzise Informationen über dieses Doppelsternsystem – wie Massen und Abstand der Sterne oder Exzentrizität der Bahn, sodass man keine weitere Freiheit hat. Das war ein indirekter Beweis für Gravitationswellen.



NASA / JPL

Das Weltrauminterferometer Lisa zur Messung von Gravitationswellen wird aus drei Satelliten bestehen, die ein gleichseitiges Dreieck mit 5 Millionen Kilometer Seitenlänge bilden und die Sonne im Abstand der Erdbahn umkreisen. Die Abstände von frei fliegenden Testmassen in den künstlichen Trabanten werden durch Laserinterferometrie auf 10 Pikometer genau bestimmt. Gravitationswellen ändern den Abstand der Testmassen, was ihren Nachweis ermöglicht. Lisa soll 2013 gestartet werden.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Relativistische Effekte, hervorgerufen durch die Gravitationsfelder der Himmelskörper, drehen deren elliptische Umlaufbahnen. Diese Periheldrehung ist bereits am Planeten Merkur messbar. Für zwei kompakte Neutronensterne, die einander umkreisen, ist der Effekt allerdings mehrhundertfach stärker.

Spektrum: Noch fehlt aber der direkte Beleg. Kann man denn überhaupt das Aussenden von Gravitationswellen genau genug berechnen – etwa wenn zwei Schwarze Löcher verschmelzen?

Schutz: Ich habe heute noch kein wirkliches Vertrauen, dass unsere Modellrechnungen solche Vorgänge schon richtig widerspiegeln. Wir sind hier auf die Messungen mit den Gravitationswellendetektoren angewiesen. Diese sind ja zurzeit schon in Betrieb oder gehen demnächst in Betrieb.

Spektrum: Erwarten Sie, dass diese Messungen in einem überschaubaren Zeitrahmen erfolgreich sein werden?

Schutz: Ich hoffe, dass wir in den nächsten fünf Jahren mit unserem Interferometer Geo 600 in der Nähe von Hannover und mit Ligo in den USA Gravitationswellen direkt beobachten werden. Wir wissen aber nicht, wo und wann die nächste messbare Gravitationswelle entsteht; ihre Stärke hängt insbesondere von der Entfernung zur Quelle ab. Wenn wir Glück haben, könnten wir in den nächsten ein bis zwei Jahren die ersten Beobachtungen machen. Mein Favorit für die erste Quelle, die wir sehen werden, sind dabei zwei verschmelzende Schwarze Löcher – dies wäre die stärkste denkbare Quelle. Es kann aber auch sein, dass wir mit den heutigen Antennen noch kein Signal finden und auf die Ligo-Weiterentwicklung »Advanced Ligo« warten müssen.

Spektrum: Wann wird diese Anlage fertig sein?

Schutz: Der Bau von Advanced Ligo wird wohl 2009 beginnen, sodass die ersten Messungen voraussichtlich 2011/12 stattfinden. Zudem soll 2013 das Weltraum-Interferometer Lisa starten.

Spektrum: Was ist die wesentliche Motivation für den Bau dieser aufwändigen Weltraumanlage?

Schutz: Mit Lisa werden wir über ein Instrument sehr hoher Empfindlichkeit verfügen. Damit wird die Astronomie in unbekannte Dimensionen vorstoßen. Es gibt einerseits viele Gebiete in der Astronomie mit Gravitationswellen, wo Voraussagen sehr schwierig und deshalb Experimente schwer zu begründen sind – zugleich sehen wir aber großes Potenzial für neue Entdeckungen. Andererseits kennen wir mit den Doppelsternsystemen sichere Quellen für Gravitationswellen. Im Fall der Schwarzen Löcher gibt es starke Anhaltspunkte für die Emission solcher Wellen. Unsere bisherigen Kenntnisse sind gut genug, um den Bau des Instruments zu rechtfertigen.

Spektrum: In welchem Sinne ergänzt oder erweitert Lisa die erdgebundenen Gravitationswellendetektoren?

Schutz: Die terrestrischen Interferometer können Gravitationswellen mit Frequenzen oberhalb von 5 bis 10 Hertz registrieren – bei tieferen Frequenzen hätten sie große Schwierigkeiten, Signale nachzuweisen: Auf der Erde ist es dafür sozusagen zu laut. Lisa hingegen ist empfindlich für die niedrigen Frequenzen von etwa 1 Hertz bis hinunter zu 10^{-4} Hertz. Die Breite des Spektrums ist ähnlich wie die zwischen Röntgenstrahlen und Radiowellen, die von astronomischen Quellen ausgesandt werden. Deren jeweiliger Nachweis hat Einsichten in völlig unterschiedliche physikalische Prozesse eröffnet.

Spektrum: Wird man mit den neuen Detektoren auch Gravitationswellen vom Hulse-Taylor-Pulsar direkt nachweisen können?

Schutz: Es wäre sehr schön, die Gravitationswellen vom Hulse-Taylor-Pulsar direkt nachzuweisen. Voraussichtlich werden wir jedoch nicht dazu in der Lage sein: Ihre Frequenz ist zu niedrig und außerdem in einem Bereich, wo die Wellen nicht sehr stark sind. Im Frequenzbereich dieses Systems erwarten wir in unserer Galaxie jedoch viele andere Doppelsternsysteme, und hier werden wir mit Lisa die Signale von einem solchen System nicht heraushören können. Die Gravitationswellen, nach denen wir suchen, müssen aus Systemen kommen, die näher am Sonnensystem liegen und bei denen die Sterne noch näher beieinander stehen, damit die Bahnperiode kürzer und die Frequenz der Gravitationswellen höher ist.

Spektrum: Demnach gibt es eine Hoffnung, mit Lisa Gravitationswellen aus anderen Doppelsternsystemen direkt nachzuweisen?

Schutz: Ja. Es gibt viele derartige Systeme, die wir schon jetzt aus optischen Beobachtungen und Messungen im Röntgenlicht kennen, und wir sind sehr zuversichtlich, dass wir ihre Gravitationswellen nachweisen werden. Mit den optischen und Röntgenbeobachtungen sehen wir nur einen kleinen Teil unserer Galaxis, während Lisa sie vollständig erfasst, sodass wir Tausende derartiger Systeme erwarten.

Spektrum: Gibt es für diese Systeme bereits – wie beim Hulse-Taylor-Pulsar – indirekte Anzeichen, dass sie Gravitationswellen aussenden?

Schutz: Bisher ist dies hier nicht so deutlich wie beim Hulse-Taylor-Pulsar. Wir haben jedoch theoretische Modelle für einige dieser Systeme, in denen Gravitationsstrahlung eine Rolle spielt. Die Wechselwirkung der Sterne ist hier sehr viel komplizierter, es gibt einen Austausch von Gas zwischen den Sternen. Die Gravitationsabstrahlung lässt sich deshalb nicht mit der gleichen Genauigkeit berechnen wie beim Doppelpulsar. Wenn wir jedoch die Gravitationswellen direkt messen, können wir umgekehrt die physikalischen Bedingungen ihrer Erzeugung recht genau beschreiben.

Spektrum: Sehen Sie eine Chance, mit Gravitationswelleninterferometern Signale der Quantengravitation nachzuweisen – Effekte, die auf einer Vereinigung von Gravitations- und Quantentheorie beruhen?

Schutz: Es ist möglich, dass die beim Urknall erzeugten Gravitationswellen für Lisa oder einen anderen künftigen Detektor stark genug sind, um in ihrem Spektrum Informationen über das Verhalten der Elementarteilchen bei sehr hohen Energien zu übermitteln. Es ist unser wichtigstes Ziel, dies herauszufinden – warten wir die Messungen ab. ◁

Die Fragen stellten **Uwe Reichert**, Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft, und **Georg Wolschin**, Privatdozent und freier Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Der Kontext macht's!

Wie ein einzelnes Gen sich ausprägt, hängt nicht zuletzt vom übrigen Genom ab. Dies betrifft die Vererbung von Blütenfarben ebenso wie etwa die Disposition für Krebs.

Von H. Frederik Nijhout

Anfang des letzten Jahrhunderts, in den frühen Tagen der Genetik, glaubten Wissenschaftler, jedes Gen bestimme ein einzelnes Merkmal wie Blütenfarbe oder Samenform. Ihre Überzeugung stützte sich auf die damals wiederentdeckten Erkenntnisse von Gregor Mendel (1822–1884). Für seine Untersuchungen Mitte des 19. Jahrhunderts wählte der Augustinermönch mit Gespür und Geschick Merkmale aus, deren Variation praktisch ausschließlich auf Unterschieden in jeweils einzelnen »Erbfaktoren« beruhte. Dadurch konnte er grundlegende Vererbungsmuster überhaupt erst erkennen.

Die meisten Merkmale werden allerdings in komplizierterer Weise vererbt, als es Mendel beschrieb. Differieren zwei Individuen in einem Merkmal, so liegt dies fast immer an Unterschieden in mehreren ihrer Gene. Die isolierten Effekte einer einzelnen Erbanlage sind gewöhnlich nur in ausgetüftelten Kreuzungsexperimenten mit sorgfältig kontrollierten Zuchtlinien zu beobachten – oder aber dann, wenn ein Gen ganz ausfällt, ohne dass Einflüsse von anderen merkmalsrelevanten Genen dies übertünchen.

Tragen viele Erbanlagen zum Endergebnis bei, kann es schon schwierig sein, den Anteil jeder einzelnen zu ermitteln. Kommen dann auch noch individuelle Variationen in etlichen der beteiligten Gene hinzu, so kann das Vererbungsmuster eines Merkmals sogar außerordentlich komplex werden. Tatsächlich umschreiben Fachleute mit dem Begriff »komplexes Merkmal« eines, dessen Vererbung nicht den Mendel'schen Regeln gehorcht.

Wie lässt sich die Vererbung eines solchen Merkmals verstehen? Ein Weg führt über die biochemischen Mechanismen, mit denen die beteiligten Gene seine Ausprägung beeinflussen. Dabei geht es aber nicht um Formeln an sich. Vielmehr möchte ich hier vor allem zeigen, wie die Interaktionen zwischen vielen Genen, die ein Merkmal hervorbringen, und ihr Ergebnis auf einfache grafische Weise veranschaulicht werden können. Diese Visualisierung ermöglicht einen intuitiven Zugang zu komplexen Erbgängen. Mehr noch: Sie erleichtert es zu verstehen, weshalb die Diagnose eines Gendefekts nicht immer die Vorhersage des individuellen Erkrankungsrisikos erlaubt.

IN KÜRZE

- Die meisten Merkmale werden von vielen Genen und von der Umwelt beeinflusst. Ob und wie sich eine **Genvariante, die zu einer Krankheit disponiert**, auswirkt, hängt daher von vielen Faktoren ab.
- Den Indizien zufolge addieren sich die Einflüsse nicht einfach. Die Beziehungen zwischen der **Ausprägung eines Merkmals** und verschiedenen Genvarianten sind nicht linear.
- In Form einer so genannten **phänotypischen Landschaft** lässt sich sichtbar machen, warum beispielsweise eine bestimmte Mutation das eine Individuum beeinträchtigt, das andere aber nicht.

Doch was fand Mendel? Als er reinerbige weißblütige Erbsenpflanzen mit reinerbigen violettblütigen kreuzte, entstanden immer Nachkommen mit violetter Blütenpracht. Kreuzte er Individuen dieser mischerbigen Generation dann untereinander, so blühte interessanterweise ein Viertel der Abkömmlinge weiß, der Rest violett (siehe linke obere Grafik



S. 72). Die moderne Erklärung lautet: Ein mischerbiges Individuum hat von beiden Elternteilen eine jeweils andere Version eines Gens erhalten und gibt dann zufallsgemäß irgendeine der beiden wieder an einen Nachkommen weiter. In diesem Fall ist die Version – das so genannte Allel – für die violette Farbe dominant über die Version für den weißen Eindruck. Kommen die beiden in einem Individuum zusammen, so ist seine Blütenfarbe daher immer violett. Weil jedes Allel des Genpaares mit gleicher Wahrscheinlichkeit vererbt wird, können zwei mischerbige »violette« Pflanzen auch »weiße« Nachkommen haben. Fachleute bezeichnen die jeweilige Genkonstellation eines Individuums als Genotyp, das resultierende Erscheinungsbild als Phänotyp.

Sämtliche Merkmale, die Mendel untersuchte, sind Beispiel für so genannte diskontinuierliche, alternative Phänotypen – weiße oder violette Blüten, glatte oder runzlige Erbsensamen, lange oder kurze Triebe. In allen diesen Fällen existierten zwei verschiedene Spielarten für ein Gen, wobei die eine die andere vollständig dominierte. Dies gilt jedoch nicht immer – selbst bei Merkmalen, die scheinbar nur von einem einzigen Gen bestimmt werden.

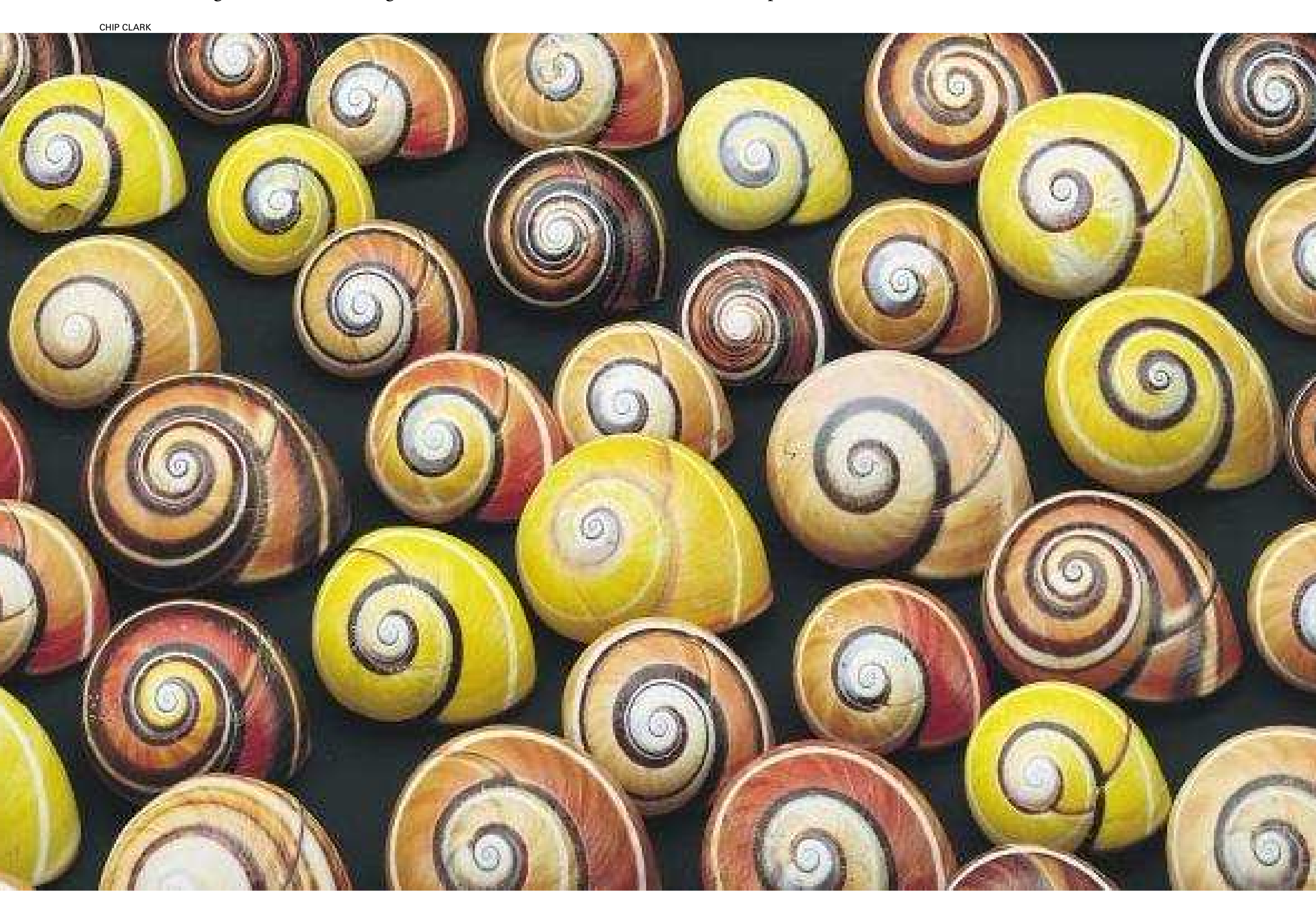
Fließende Variation

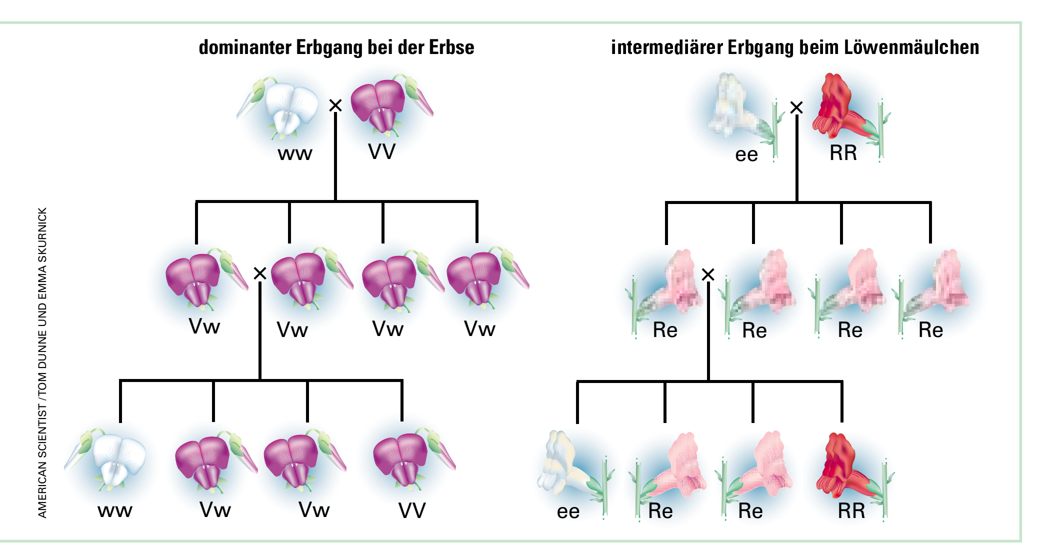
Davon zeugt zum Beispiel die Blütenfarbe bei Löwenmäulchen (siehe Grafik S. 72, rechts). Den Erbgang beschrieb erstmals der Mediziner und Botaniker Erwin Baur, rund 25 Jahre bevor er 1927 das Kaiser-Wilhelm-Institut für Züchtungsforschung in Müncheberg gründete. Die Blütenfarbe hängt wieder von einem einzigen Gen ab. Zwei häufige Allele sind hier »rot« und »elfenbeinfarben«. Doch beim Löwenmäulchen ist keines der beiden dominant: Kreuzt man ein elfenbeinfarbiges und ein tiefrot blühendes, so tragen die Nachkommen blassrote Blüten. Diese Kombination ergibt also eine intermediäre Farbe; man spricht auch von unvollständiger Dominanz. Die Blütenfarbe des Löwenmäulchens ist ein »kontinuierlicher« Phänotyp, denn potenziell kann zwischen den reinrassigen Extremen elfenbeinfarben und rot ein ganzes Spektrum von Rotschattierungen auftreten.

Tatsächlich wird ein Merkmal in einer Population oft in fließend variierender Form ausgeprägt (siehe Foto unten). Von Umwelteinflüssen einmal abgese- ▷

▼ **Manche Merkmale variieren sehr stark, was diese Gehäuse aus einer Population der Baumschnecke *Polymita picta* eindrucksvoll illustrieren. Sie kommt nur am östlichen Ende der Insel Kuba vor. Die Variation ihres Gehäusemusters entsteht durch Wechselwirkungen vieler verschiedener Gene. Wie sich Veränderungen eines einzelnen Gens auswirken, hängt aber vom Gesamtgenotyp des einzelnen Tiers ab.**

CHIP CLARK





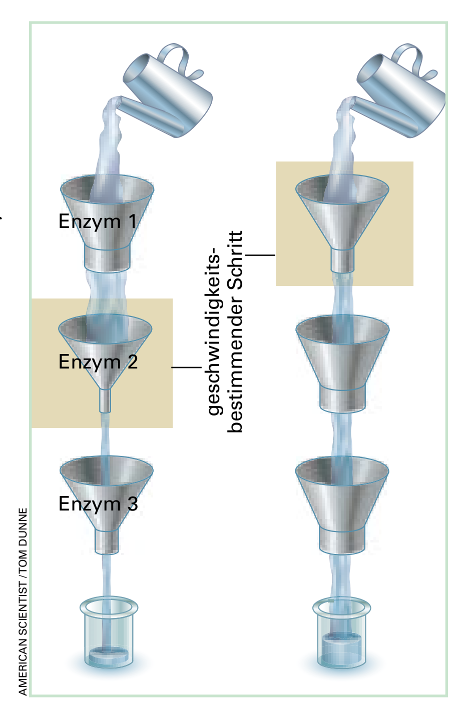
Die violette Blütenfarbe der Erbse wird dominant vererbt (links). Die »violette« Version des Farbgens (V) bestimmt den Effekt, selbst bei mischerbigen Individuen. Weiß blühen nur Pflanzen, die von beiden Elternteilen ein »weißes« Allel (w) erhalten haben. Intermediäre, blassrote Blüten treten dagegen beim Löwenmäulchen auf, wenn reinerbig rote mit reinerbig elfenbeinfarbigen Pflanzen gekreuzt werden (rechts).

▷ hen, beruht dies manchmal auf der Variation eines einzelnen Gens, weitaus häufiger jedoch auf dem Einfluss vieler Gene. Selbst die Blütenfarben sind letztlich das Ergebnis mehrerer interagierender genetischer Faktoren, denn an der Farbstoffsynthese wirkt eine Vielzahl von Erbanlagen mit.

Einige der Gene tragen die verschlüsselte Bauanweisung für Enzyme, die farblose Vorläufersubstanzen wie Aminosäuren und Zuckerarten in verschiedenfarbige Pigmente verwandeln helfen. Der Stoffwechselweg vom Ausgangs- zum Endprodukt kann mehr als ein Dutzend Schritte umfassen, jeweils katalysiert von einem anderen Enzym. Das ist aber noch nicht alles. Andere Gene kodieren für Eiweißstoffe, welche die Produktion und Aktivität dieser Enzyme regulieren. Sie bestimmen somit Zeit und Ort der Pigmentproduktion. Weitere Proteine steuern die Stabilität und Lokalisation der Farbstoffe in der Zelle. Alle Gene für solche Regulatormoleküle werden ihrerseits von anderen Proteinen, den Transkriptionsfaktoren, reguliert, die wiederum auf eigenen Genen verschlüsselt sind. Solche schier endlosen Regulationskaskaden und Interaktionsnetzwerke mögen auf den ersten Blick seltsam anmuten, sind jedoch die Regel – selbst bei den einfachsten Merkmalen.

Wie kann es dann aber so aussehen, als kontrolliere ein einziges Gen die Ausprägung eines Merkmals? Relativ leicht passiert dies, wenn das von ihm kodierte Enzym den Schritt eines Stoffwechselweges katalysiert, der die Geschwindigkeit nach oben begrenzt. Eine einfache mechanische Analogie hierfür wäre eine Serie von Trichtern mit verschieden weitem Hals, durch die nacheinander Wasser fließt. Es ist wie beim Verkehrsstrom: Der schmalste Engpass bestimmt dann die Durchflussrate des Ganzen (siehe Grafik unten).

Man stelle sich nun vor, jeder Trichter symbolisiere die Aktivität eines bestimmten Enzyms in einem Stoffwechselweg wie der Pigmentsynthese. Das Wasser stehe für die Ausgangs-, Zwischen- beziehungsweise Endprodukte. Hohe Aktivität – sei es durch große Mengen an Enzym, hohe katalytische Effizienz der einzelnen Moleküle oder zielgenauen Einsatz in der Zelle – entspricht dann weiten Trichtern, geringe Aktivität hingegen engen. Der engste davon soll das Enzym sein, das von Baurs »rot/elfenbeinfarbig-Gen« kodiert wird.



An der Herstellung eines Blütenfarbstoffs sind in Wirklichkeit mehrere Gene mit ihren Enzymen beteiligt. Nur eines bestimmt aber die Geschwindigkeit der Synthese, symbolisiert hier anhand von Wasser, das eine Serie von Trichtern durchläuft. Da das Wasser nicht schneller unten ankommen kann, als es durch den engsten Trichter strömt, bestimmt dieser die Flussrate des Gesamtsystems.

Somit hängt von seiner Leistung ab, wie schnell neuer Farbstoff am Ende entsteht.

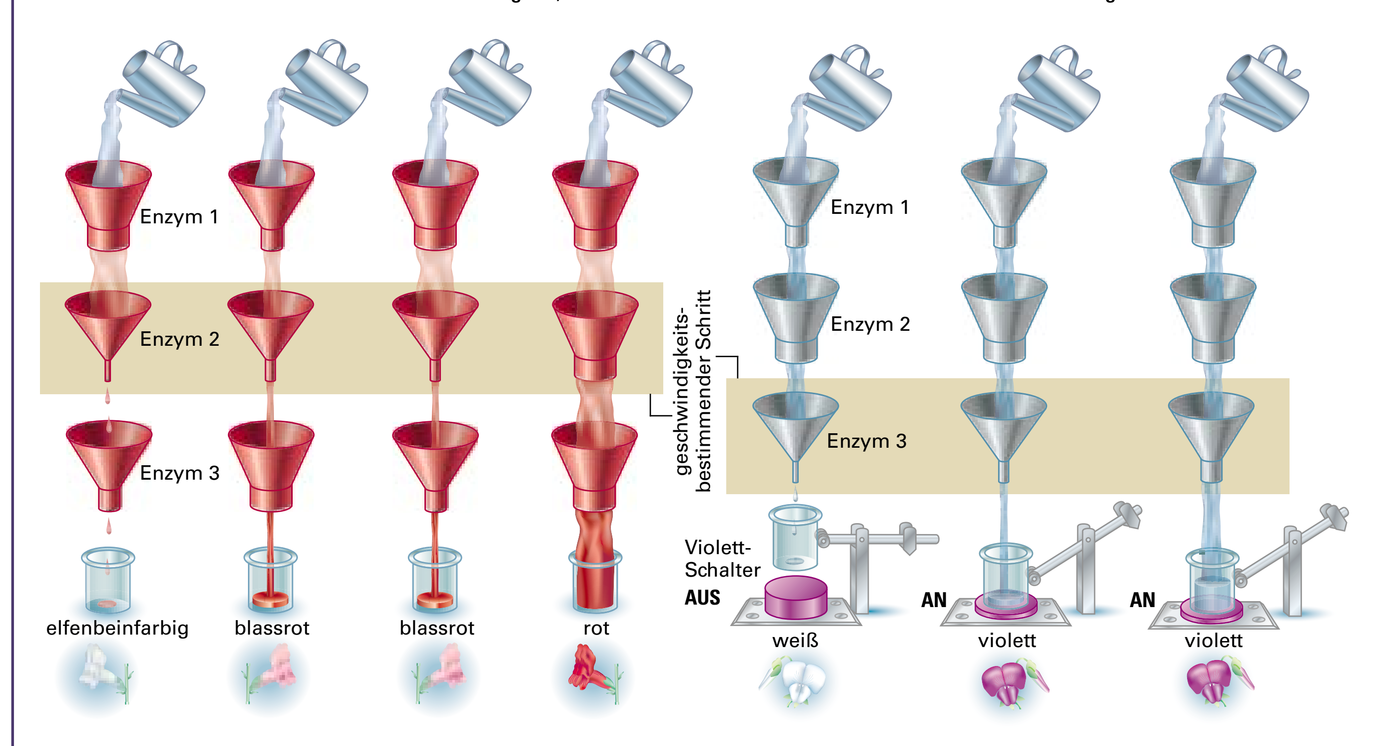
Die Aktivität der anderen Enzyme darf in diesem einfachen Kaskadenmodell ruhig schwanken – solange sie nicht unter das kritische Niveau sinkt, sieht es für den Beobachter so aus, als kontrolliere nur dieses eine Gen die Variationen der Blütenfarbe.

Passiert das aber doch, wird der zuvor determinierende »rot/elfenbeinfarbig-Schritt« nicht mehr allein die Blütenfarbe bestimmen. Wenn etwa im Extremfall ein anderes Gen wegen eines Defekts ein inaktives Enzym liefert und so den Stoffwechselweg völlig blockiert, spielt es für die Blütenfarbe keine Rolle mehr, welche Allele des rot/elfenbeinfarbig-Gens das Individuum trägt. Fachleute nennen dieses Phänomen, bei dem ein Gen beziehungsweise Genpaar den beobachteten Effekt eines ganz anderen stört oder verdeckt, Epistase. Sogar in diesem vermeintlich simplen Beispiel können also die Auswirkungen einer Erbanlage auf ein Merkmal durchaus von anderen Genen desselben Stoffwechselweges verfälscht werden.

Mit einem ähnlichen mechanischen Modell lässt sich auch die Ausprägung der beiden alternativen Blütenfarben bei

Hydraulische Modelle für Blütenfarben

Selbst wenn ein Enzym den geschwindigkeitsbestimmenden Schritt der Pigmentsynthese katalysiert und je nach Genkombination sukzessive stärker oder schwächer agiert, kann sich ein Merkmal nach dem Alles-oder-nichts-Prinzip ausprägen. Erforderlich ist nur ein Mechanismus, der ab einem bestimmten Schwellenwert einen Schalter betätigt.



Der Eindruck, beim Löwenmäulchen bestimme das Gen mit seinen zwei Varianten »rot« oder »elfenbeinfarbig« die Blütenfarbe, täuscht. Er entsteht nur, weil das Gen für ein geschwindigkeitsbestimmendes Enzym im Syntheseweg des roten Pigments kodiert (beige unterlegt). Gleichgültig wie die genetisch bedingte Gesamtaktivität der anderen Enzyme variiert – solange sie nicht die des kritischen Enzyms unterschreitet, entscheidet nur Letzteres über die Farbintensität. Die Weite des Trichters entspricht hier der Gesamtaktivität beider ererbter Versionen des Blütenfarbgens.

Ein abgewandeltes Modell erklärt die Dominanz der »violetten« über die »weiße« Genversion bei Erbsen. Ein Sensor mit vorgegebenem Schwellenwert – symbolisiert durch einen Waagebalken – setzt den unterschiedlichen Durchfluss in eine Alles-oder-nichts-Reaktion um. Wird der Schwellenwert erreicht, kippt der Balken, betätigt den »Violett-Schalter« und gibt die Pigmentsynthese frei. Solange mischerbige Pflanzen über genügend Gesamtaktivität des kritischen Enzyms 3 (mittelweiter Trichter) verfügen, um die Waage kippen zu lassen, sind sie farbintensiv wie reinerbige Pflanzen mit hoher Enzymaktivität.

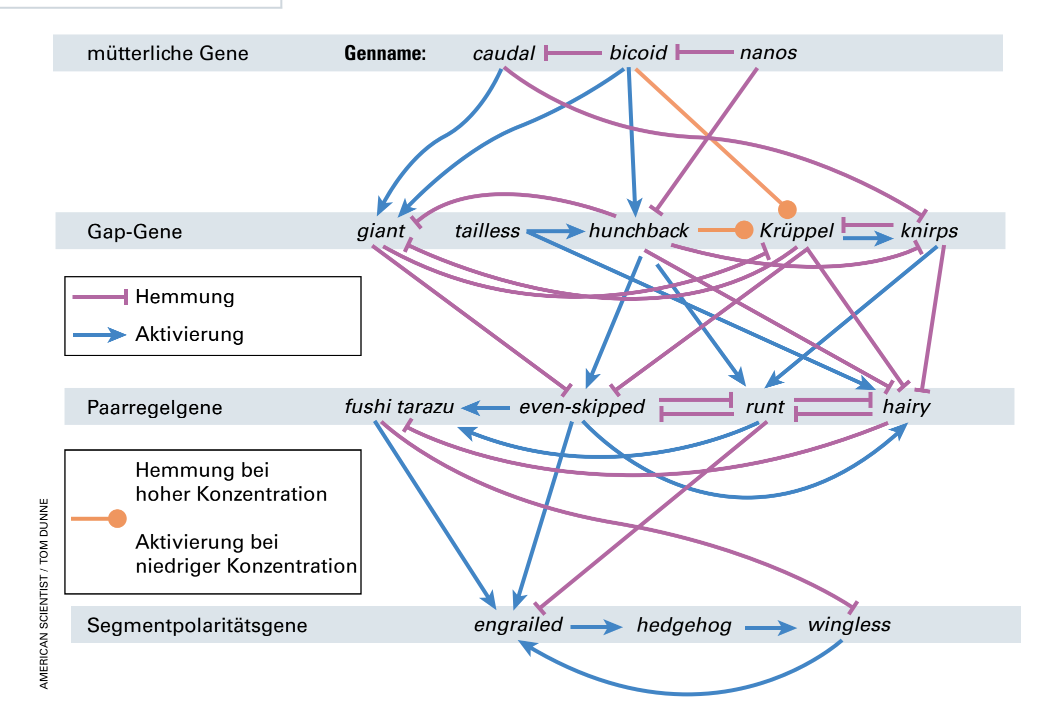
Mendels Erbsen veranschaulichen. Es bedarf lediglich eines Sensors, der die Überschreitung eines Schwellenwertes registriert; das kann eine Art Balkenwaage sein (siehe rechte Grafik im Kasten oben). Solange der Fluss durch das System nicht ausreicht, den Waagebalken zu kippen und damit den Knopf zu drücken, bildet sich der eine Phänotyp (hier weiß) heraus; ansonsten tritt der andere (violett) auf, wie hoch auch immer die Schwelle überschritten wird.

Die Beziehungen zwischen Gen und Merkmal werden häufig anhand von Mutationen untersucht, natürlich vorkommenden oder künstlich erzeugten. Die meisten Mutationen vermindern die Aktivität des erzeugten Proteins, und die Folgen können Hinweise auf die normale Funktion bei der Ausprägung des Merkmals geben.

Augenfleck statt Bein

Im Lauf der Jahre mussten die Biologen allerdings erkennen, dass die Auswirkungen einer Mutation stark vom Kontext abhängen, in dem das betroffene Gen exprimiert wird, also sein Produkt erzeugt. Ein Beispiel findet sich bei der Embryonalentwicklung von Raupen und später bei ihrer Metamorphose zum Falter. So beobachtete ein Team um Sean Carroll von der Universität von Wisconsin in Madison, dass die lokal begrenzte Expression eines Gens namens *distalless* die Entstehung eines Raupenbeins bewirkt. Später, während der Flügelentwicklung des Schmetterlings, induziert dasselbe Gen aber einen farbigen Augenfleck. Fällt es aus, äußert sich dies somit je nach Zeitpunkt in anderer Weise.

Kontexteffekte können sehr deutlich auch bei so genannten Knockout-Mäusen beobachtet werden. Wie die Bezeichnung andeutet, wird hier ein interessierendes Gen gezielt ausgeschaltet. Zum Beispiel verursacht der Knockout des Retinoblastom-Gens bei einer bestimmten Mäuselinie schwere Missbildungen und führt zum Absterben von Embryonen. Bei einem anderen Mäusestamm hingegen bleibt die gleiche Mutation wirkungslos: Die Embryonen wachsen zu fortpflanzungsfähigen Tieren heran, wie ▷



Ein Musterbeispiel für ein komplexes genetisches Netzwerk bietet die frühe Embryonalentwicklung der Taufliege *Drosophila*. Mehrere Organisationsebenen mit positiver, negativer und variabler Rückkopplung kennzeichnen das System. In einem derart komplexen Netzwerk ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich die Variation einer Komponente additiv auswirkt. Die Gene sind mit ihrem Eigennamen angegeben.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▷ Michael Rudnicki und seine Kollegen an der McMaster-Universität im kanadischen Hamilton feststellten.

Auch in der Genetik von Krebserkrankungen spielen Kontexteffekte eine wesentliche Rolle. Mutieren Gene, die das normale Wachstum und die geordnete Teilung von Zellen steuern, so kann dies die Regulation aus dem Gleichgewicht bringen und Zellen zu unkontrolliertem Wachstum anregen. Ob ein entgleistes Gen tatsächlich Krebs verursacht, hängt jedoch oft vom genetischen Hintergrund seines Trägers ab sowie von äußeren Einflüssen, etwa Schadstoffen durch Rauchen. Bekommen Mäuse ein Krebsgen in ihr Erbgut eingeschleust, so induziert es normalerweise nur in wenigen Geweben Tumoren, selbst wenn es in vielen anderen exprimiert wird. Offenbar herrschen nur in bestimmten Zelltypen Bedingungen, unter denen sich die Mutation schädlich auswirken kann.

Gewöhnlich werden solche unterschiedlichen Auswirkungen »Kofaktoren« zugeschrieben, die individuell und gewebeabhängig variieren, deren Identität aber nur in wenigen Fällen genauer bekannt ist. Die einfachste Hypothese zur Erklärung lautet: Jeder Faktor für sich wirkt nur minimal, erst die Summe vieler kleiner Effekte hat einen deutlich erkennbaren Einfluss.

Entspräche diese Hypothese der additiven Wirkungen den Tatsachen, so könnte man einen Katalog aller beteiligten Gene aufstellen und jedem ihrer Allele einen Zahlenwert zuordnen, der seinem eigenständigen Effekt auf das Merkmal entspricht. Die Auswirkungen verschiedener Allelkombinationen wären dann durch einfache Addition zu berechnen. Zur Summe der genetischen Effekte könnte man dann weitere Zahlenwerte für verschiedene Umweltfaktoren addieren und erhielte präzise den resultierenden Phänotyp. Im Falle einer drohenden Tumorerkrankung etwa ließe sich nach der additiven Hypothese berechnen, ob eine bestimmte Person erkranken wird oder nicht – vorausgesetzt alle Kofaktoren wären bekannt.

Keine simple Addition

Das sind sie aber nicht. Daher lässt sich nur die Wahrscheinlichkeit einer Erkrankung abschätzen. Sie ergibt sich aus der statistischen Betrachtung großer Bevölkerungsgruppen, in denen ein Teil der Individuen erkrankt ist. Je nachdem wie stark die Erkrankungsraten mit einem bestimmten Faktor – etwa den Rauchgewohnheiten – korrelieren, wird das von ihm ausgehende Risiko eingestuft. Die errechneten Wahrscheinlichkeiten sind jedoch keine wirklichen Vorhersagen, sondern bloß statistische Beschreibungen der speziell untersuchten Gruppe. Die einzige sichere Vorhersage ist also, dass in anderen, aber genau gleich zusammengesetzten Gruppen annähernd die gleichen Korrelationen und Wahrscheinlichkeiten herauskämen. Selbst wenn man den Einfluss aller beteiligten Faktoren messen könnte, wäre wohl mit dem additiven Modell nicht viel gewonnen. Denn nach allem, was wir inzwischen über die Zusammenhänge von Genotyp und Phänotyp wissen, muss es falsch sein. Wie erwähnt, üben Gene ihren Einfluss über komplexe Systeme interagierender Proteine aus, sodass jeder Mitspieler nur sehr indirekt zum Endergebnis beiträgt.

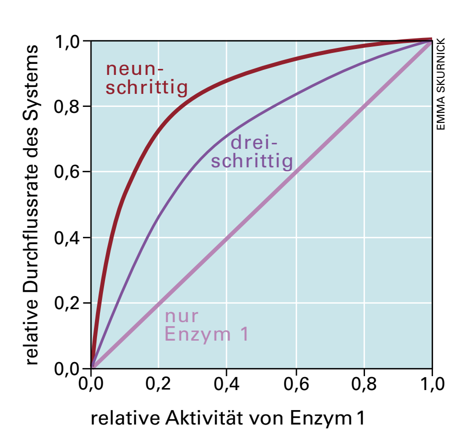
Ein Beispiel ist das regulatorische Netzwerk, das die frühe Embryonalentwicklung der Taufliege *Drosophila* steuert (siehe Grafik oben). Die beteiligten Gene regulieren die Expression anderer Gene, die häufig selbst wieder regulatorische Funktionen haben. In solch komplexen Netzwerken mit divergierenden und konvergierenden Regelketten, mit positiver und negativer Rückkopplung ist es sehr unwahrscheinlich, dass eine variierende Komponente rein additive Folgen hat, wenn sie mit anderen variierenden interagiert.

Das vielleicht wichtigste Argument gegen rein additive genetische Effekte lautet jedoch, dass keine lineare Beziehung zwischen genetischer und Merkmalsvariation besteht, weil eben die Wirkung kontextabhängig ist. Entsprechend schwer lässt sich vorhersagen, was passiert, wenn mehrere Gene gleichzeitig variieren. Nichtlinearität eines Systems bedeutet schlicht, dass sich bei der grafischen Darstellung der Abhängigkeit keine Gerade ergibt. Illustrieren lässt sich dies leicht anhand der dominanten und

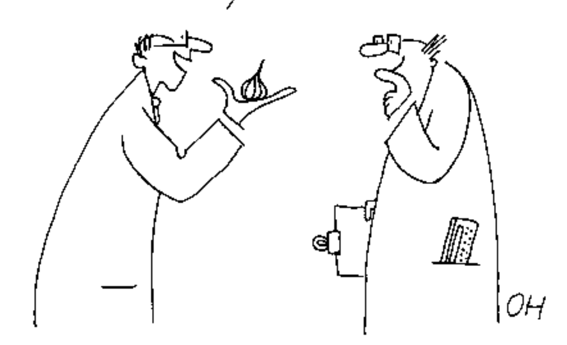
rezessiven Allele bei Mendels Erbsenpflanzen. In dem dafür vorgestellten mechanischen Modell verhindert der »Alles-oder-nichts-Schalter«, dass sich die Blütenfärbung (der Output) kontinuierlich mit der Zahl der »violetten« Allele (dem Input) intensiviert. Zwei violette bewirken dadurch nicht mehr als nur eines. Wen wundert es, dass Dominanz gewöhnlich aus nichtlinearen Prozessen (wie solchen mit Schwellen) resultiert, bei biochemischen wie embryonalen Abläufen.

Ein inzwischen bekanntes Beispiel aus der Biochemie publizierten 1981 Henrik Kacser und James Burns von der schottischen Universität Edinburgh. Sie berechneten für eine Serie enzymatisch katalysierter Schritte die Beziehung zwischen der Aktivität eines der Enzyme und der Gesamtreaktionsgeschwindigkeit, der Durchflussrate. Bei einem System mit nur einem Enzym verändert sich die Rate einfach linear mit dessen Aktivität. Sobald jedoch mehr als ein Enzym mitwirkt, wird die Rate eine nichtlineare Funktion der Aktivität eines jeden Beteiligten. Und diese Nichtlinearität verstärkt sich, je länger die Reaktionskette wird (siehe Grafik unten).

Betrachten wir das Ganze für eines der Enzyme darin genauer. Von seinem



Die Durchflussrate einer enzymatischen Kettenreaktion wächst nichtlinear mit der genetisch bedingten Durchschnittsaktivität eines Enzyms, selbst wenn die der anderen beteiligten Enzyme konstant bleibt. Die Nichtlinearität ist umso ausgeprägter, je mehr Schritte hinzukommen. Erbt ein Individuum ein eher mäßig aktives Enzym, ist der Gesamtdurchfluss einer neunstufigen Stoffwechselreaktion fast so hoch, als wäre die effizienteste Form vorhanden.



Gen sollen zwei Spielarten, sprich Allele, existieren, die für zwei unterschiedlich aktive Varianten des Enzyms kodieren. Reinerbige Individuen tragen zwei gleiche Exemplare eines Allels und vertreten damit entweder die obere oder die untere Bandbreite möglicher Enzymaktivität. Bei mischerbigen Individuen – solchen mit einem ungleichen Paar – liegt dagegen die Gesamtaktivität des Enzyms genau auf halbem Wege zwischen der Ober- und Untergrenze. Da jedoch der Durchfluss durch das vielschrittige System nicht mehr linear von der Enzymaktivität abhängt, erreicht er beim mischerbigen Individuum ähnliche Bereiche wie bei der einen reinerbigen Konstellation. Dadurch sieht es so aus, als sei dieses eine Allel dominant über das andere.

Wohlgemerkt: Der Dominanzeffekt ist hier keine Eigenschaft des Allels selbst, denn solange man auf der Ebene des einzelnen Enzyms bleibt, wirken sich die Allele rein additiv aus. Er entsteht nur im Kontext der ganzen Reaktionskette, in die das Enzym eingebunden ist. Dominanz ist somit eine Eigenschaft des Gesamtsystems.

Bei ihren Berechnungen nahmen Kacser und Burns zur Vereinfachung an, die Aktivität aller anderen beteiligten Enzyme wäre konstant. In echten biologischen Systemen ist dies jedoch äußerst unwahrscheinlich. Über Tausende von Generationen haben sich für die meisten, wenn nicht alle Enzyme eines Stoffwechselweges verschiedene Varianten entwickelt. Um wieder klein anzufangen: Was geschieht, wenn das auf zwei der Enzyme einer Reaktionskette zutrifft? Mit nun zwei unabhängigen veränderlichen Faktoren lässt sich das Verhalten des Systems nicht mehr anhand einer Kurve in einer Ebene grafisch darstellen. Das gelingt nur mit einer dreidimensional geformten Fläche, der phänotypischen Landschaft (siehe Kasten S. 76). Jeder Punkt auf dieser Landschaft repräsentiert den kombinierten Effekt zweier unabhängiger Variablen, hier zunächst der Variation zweier verschiedener Gene. Die abhängige Variable – der Phänotyp oder das ausgeprägte Merkmal – ist dabei der Flussrate durch das Gesamtsystem äquivalent.

Angenommen, eine Population besäße zu Anfang keinerlei genetische Variabilität: Jedes Gen existierte nur jeweils in einer einzigen Form, und alle Individuen wären somit reinerbig für jedes Gen. Dann kann jedes Gen nur einen einzigen genetischen Wert an seiner horizontalen Achse im Diagramm annehmen, und alle Individuen besetzten einen einzigen gemeinsamen Ort auf der phänotypischen Landschaft. Tritt nun eine Mutation in einem der beiden gewählten Gene auf, wie wird sich das auf den Phänotyp auswirken? Das Ergebnis hängt einerseits davon ab, wie stark die Mutation das Genprodukt verändert und wo im Gelände die Population versammelt ist.

Gefahr am Steilhang

Beseitigt die Mutation zum Beispiel eine Art Bremse im Gen, steigt die Aktivität des entsprechenden Enzyms beträchtlich gegenüber ihrem Ausgangswert. Diese Mutation verschiebt daher den genetischen Wert um einen entsprechenden Betrag an der Achse, die das betroffene ▷

▷ Gen repräsentiert – und damit verschiebt sie auch das betroffene Individuum auf einer Profillinie parallel dazu (a und b im Kasten rechts). Weist die Landschaft in diesem Bereich einen Steilhang auf, so verändert sich der Phänotyp viel deutlicher als bei sanfter Steigung. Die Wirkung einer Mutation auf ein Merkmal hängt also – wie übrigens auch dessen Dominanz – davon ab, wo auf der phänotypischen Landschaft sich sein Ausgangspunkt befand. Anders gesagt: Die Größe des Effekts ist keine Eigenschaft der Mutation an sich, sondern wieder eine Funktion des Ganzen.

Anhand der phänotypischen Landschaft wird zugleich verständlich, weshalb Mutationen sich bei anderem genetischen Hintergrund so grundverschieden auswirken können. Dieser bestimmt nämlich, wo im Gelände ein Individuum oder eine Population lokalisiert ist.

Mehrdimensionale Landschaften

Man betrachte dazu zwei Individuen X und Y, die denselben Phänotyp aufweisen, daher auf derselben Höhenlinie sitzen, obwohl sich ihre Allele für Gen A und Gen B unterscheiden. Durch den Positionsunterschied haben Mutationen in Gen A für beide Träger ganz unterschiedliche Konsequenzen: Der Phänotyp von Y ändert sich deutlich, der von X hingegen kaum. Genau umgekehrt verhält es sich für Mutationen des Gens B (siehe Grafik a und b im Kasten).

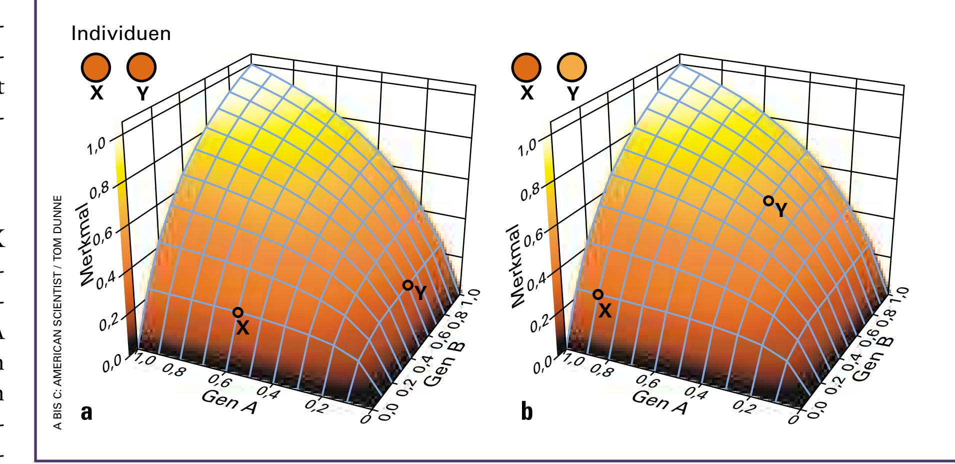
In einer Population, in der alle Individuen den Genotyp von X aufweisen, könnten sich daher mit der Zeit viele Mutationen in A anhäufen, die wegen ihrer bestenfalls geringen Auswirkungen auf das Merkmal keinen Selektionsnachteil brächten. Evolutionsbiologen pflegen solche Mutationen als neutral zu bezeichnen. Mutationen in B hätten dagegen deutliche, womöglich nachteilige Auswirkungen und würden selektionsbedingt dann aus der Population verschwinden. Evolutionär heißt das hier: Das eine Gen kann ziemlich schadlos zahlreiche Varianten entwickeln, das andere hingegen kaum – und dies obwohl beide Gene für Enzyme desselben Stoffwechselweges kodieren und gleichartige Auswirkungen auf das Merkmal hätten, könnte man sie isoliert untersuchen.

Dasselbe lässt sich für eine Population von Individuen mit dem Genotyp Y durchspielen. Hier wären Mutationen in Gen B neutral, in Gen A problematisch.

Die phänotypische Landschaft

Anhand einer dreidimensional gebogenen Fläche lässt sich veranschaulichen, wie stark zwei Gene oder ein Gen und ein Umweltfaktor ein Merkmal beeinflussen.

Zwei Personen X und Y können sich äußerlich in einem Merkmal (einem Phänotyp) gleichen, während sie sich in der Aktivität ihrer relevanten Enzyme von Gen A und Gen B stark unterscheiden (a). Sie sitzen dann zwar auf derselben Höhenlinie der so genannten phänotypischen Landschaft, aber an verschiedenen Orten. Eine Mutation in Gen A, welche die Aktivität des entsprechenden Enzyms erhöht, wird sich daher »geländebedingt« sehr unterschiedlich auswirken: Der Phänotyp von Y ändert sich dramatisch, der von X hingegen bleibt praktisch unverändert, weil sich sein Genotyp nur längs einer Höhenlinie verschiebt (b).



Die Schwere einer Mutation – von neutral bis gravierend – ist also wiederum keine Eigenschaft des mutierten Allels selbst, sondern davon abhängig, welche Allele anderer Gene bei dem Individuum oder der Population vorliegen.

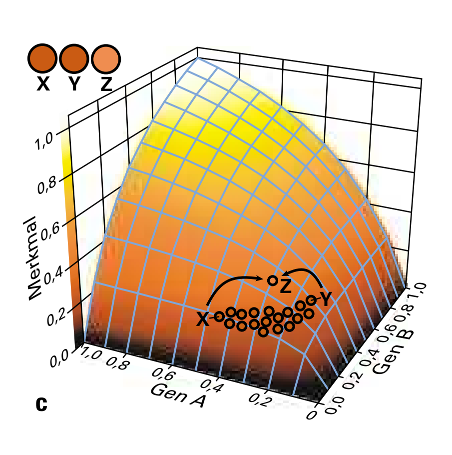
Prinzipiell kann man in die Darstellung der phänotypischen Landschaft nicht bloß zwei, sondern alle genetischen Variablen einbeziehen, die ein Merkmal beeinflussen. Voraussetzung: die Mechanismen, die das Merkmal hervorbringen, müssen bekannt und in Gleichungen umzuformen sein, die letztlich die Gestalt der phänotypischen Landschaft bestimmen. In der Praxis ist diese Aufgabe überaus schwer lösbar, derzeit im Großen und Ganzen sogar nur bei biochemischen Systemen, da es einer präzisen mathematischen Beschreibung der Reaktionsgeschwindigkeiten und der Faktoren, von denen sie abhängen, bedarf. In den letzten zehn Jahren ist aber das Verständnis entwicklungsbiologischer Prozesse so gewachsen, dass inzwischen genaue mathematische Modelle, beispielsweise der frühen Embryonalentwicklung der Taufliege *Drosophila melanogaster,* formuliert werden.

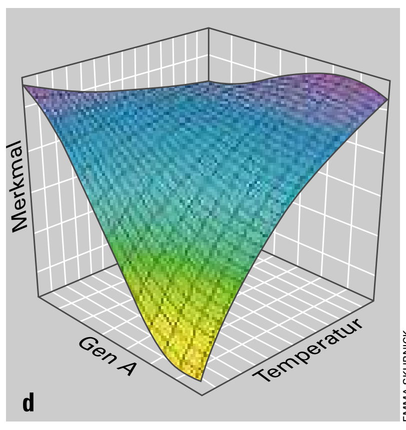
Angesichts der rasant fortschreitenden Erkenntnisse dürften bald auch zahlreiche andere biologische Systeme und Merkmale so weit verstanden sein, dass sie sich mathematisch erfassen lassen. Da sie in der Realität dem Einfluss vieler, unabhängig variierender Gene unterliegen, können sie nur in Form multidimensionaler phänotypischer Landschaften dargestellt werden, mit einer Achse für jede der vielen unabhängigen Variablen. Im Computer ist die Handhabung multidimensionaler Oberflächen und ihrer Biegungen nicht besonders schwierig – es ist jedoch unmöglich, ihre Gestalt zeichnerisch darzustellen. Zur Veranschaulichung betrachten wir daher gewöhnlich nur zwei unabhängige Variablen gleichzeitig, immer im Hinterkopf, dass diese in einem größeren, multidimensionalen Rahmen stehen.

Wenn jedes Individuum als Punkt auf der Phänotypfläche dargestellt wird, repräsentiert eine Population mit vielen Mitgliedern eine Punktwolke. Ihre Aus-

Die phänotypische Landschaft erklärt auch, weshalb sich die genetisch variierenden Individuen einer Population gewöhnlich auf einen engen Optimalbereich zusammendrängen (c). Wenn sich zwei Individuen X und Y von entgegengesetzten Extremen des Bereichs miteinander paaren, werden ihre Nachkommen auf eine andere phänotypische Höhenlinie gelangen, die unter Umständen eine schlechtere Anpassung an die gewöhnlich herrschenden Umgebungsbedingungen bedeutet. Sie werden dann eher wieder eliminiert.

Anhand einer phänotypischen Landschaft lassen sich auch die Konsequenzen veranschaulichen, wenn ein variierendes Gen mit einem variierenden Umweltfaktor wie der Temperatur interagiert (d). Beispielsweise könnte eine höhere Temperatur die Blütenfarbe intensivieren, was sich aber nur dann deutlich bemerkbar machen würde, wenn das Produkt von Pflanzengen A träge arbeitet oder in zu geringer Menge entsteht.





dehnung in den unterschiedlichen Dimensionen entspricht der Bandbreite an Allelen, die speziell diese Gruppe für jedes am Merkmal beteiligte Gen aufweist. Anhand der phänotypischen Landschaft könnte man dann beispielsweise verfolgen, wie sich die gesamte Populationswolke mit der Zeit verschiebt, wenn neue Mutationen auftreten und die natürliche Auslese greift.

Einbezogene Umwelt

Bei einmal erreichtem phänotypischem Optimum breitet sich die Punktwolke entlang der Höhenlinien kaum mehr aus, da die Nachkommen zweier Individuen von weit entfernten Punkten der Höhenlinie wegen der Nichtlinearität des Systems nicht mehr auf gleicher Höhe landen – sie verlassen den Optimalbereich (siehe oben, Grafik c). Damit sind Selektionsnachteile zu erwarten. Wir können deshalb vorhersagen, dass Populationen mit der Zeit relativ kompakte Punktwolken auf der phänotypischen Landschaft bilden – zumindest solange nicht weitere hinzukommende Variablen die Gestalt der Landschaft verändern oder neuen evolutionären Druck erzeugen.

Eine quantitative mathematische Beschreibung eines Phänotyps hat zudem den Vorteil, dass sich sämtliche Faktoren einbeziehen lassen, die seine Entwicklung und Eigenschaften beeinflussen. Man braucht sich nicht auf Gene oder die entsprechenden Enzyme zu beschränken, sondern kann auch nichtgenetische Parameter berücksichtigen. Beispiele sind Temperatur, Nährstoffzufuhr oder Hormone, die der Körper auf externe Stimuli hin ausschüttet. Diese umweltabhängigen Faktoren können die Geschwindigkeit bestimmter enzymatischer Reaktionen verändern oder neue Interaktionen induzieren. Solche Effekte sind mathematisch ebenso erfassbar und darstellbar wie die eines Gens.

Zum Beispiel beschleunigt ein Temperaturanstieg um 10 Grad Celsius manche biochemische Reaktion um das Doppelte, während er andere behindert. Dies kann völlig unerwartete Konsequenzen für die Funktion eines komplexen biochemischen Synthesewegs haben. Mit einer mathematischen Modellierung solcher Prozesse lassen sich die Auswirkungen der Temperatur auf die Reaktionsgeschwindigkeiten berechnen (siehe Grafik d im Kasten). Die Gestalt der phänotypischen Landschaft wird in diesem Fall sowohl von genetischen als auch von umweltbedingten Variablen bestimmt. So ist leicht abzulesen, wie Umwelteffekte die Empfindlichkeit des Systems gegenüber Mutationen verschiedener Gene beeinflussen.

In einer solchen phänotypischen Landschaft repräsentiert ein Profil parallel zur Umweltachse die – beispielsweise temperaturabhängige – »Reaktionsnorm« eines individuellen Genotyps. Ein Profil parallel zu einer genetischen Achse spiegelt hingegen den Effekt von Mutationen auf ein Merkmal unter der gegebenen Umweltbedingung wider. Solange diese Landschaft nicht eben und linear ist, was sie vermutlich niemals sein kann, werden die Umwelteffekte somit ebenso kontextabhängig sein wie die genetischen.

Obwohl die auf Papier darstellbare Zahl der Dimensionen beschränkt ist, ermöglichen Grafiken wie diese doch ein intuitives Verständnis der Interaktionen zwischen Genen und anderen Faktoren. Die in Wirklichkeit multidimensionalen Systeme sind zumindest rein mathematisch darstellbar. Irgendwann, mit der Entwicklung geeigneter computergestützter Visualisierungsmethoden, wird es uns vielleicht sogar möglich sein, in multidimensionalen Räumen frei umherzuwandern und dadurch sicherlich noch tiefere Einblicke in diese komplexen Phänomene zu gewinnen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



H. Frederik Nijhout, Professor für Biologie an der Duke-Universität in Durham (North Carolina), promovierte 1974 an der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts). Er untersucht unter anderem, wie Hormone das Wachstum und die Metamorphose von Insekten kontrollieren, sowie die Mechanismen, die eine Umschaltung zwischen alternativen Entwicklungsprogrammen ermöglichen.

On the association between genes and complex traits. Von H. F. Nijhout in: Journal of investigative Dermatology, Bd. 8, S. 162, 2003

The nature of robustness in development. Von H. F. Nijhout in: BioEssays, Bd. 24, S. 553, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.



Hochspannung im Physiksaal

Erfinderclubs bieten Schülerinnen und Schülern ab der 9. Klasse Gelegenheit und Unterstützung für unkonventionelle Experimente.

Von Kathrin Schlößler

Zisch. Rauch und Feuer im Physikraum. Vier Schüler grinsen verlegen. So war das nicht gedacht. Ein Lehrer holt schnell eine Löschdecke. Nach kurzer Bestandsaufnahme – niemand ist verletzt, das Feuer hat keinen ernsten Schaden angerichtet – kehrt die heitere Stimmung zurück.

Wochenlang hat sich die sechsköpfige Zehntklässler-Gruppe (Stefan Vonderlend, Maik Thöner, Bo Thöner, Marius Müller, Yannik Gerstenberger und Bryan Vaupel) über das Thema »Flugobjekte« informiert und schließlich ein Experiment ausgewählt: den Bau eines Miniatur-Heißluftballons. Nach der Berechnung von Umfang, Volumen und Gesamtgewicht haben die Schüler das Fluggerät aus Seidenpapier, Kleber und Tesafilm zusammengebaut. Drei Bunsenbrenner sollen die Heißluft für den Auftrieb erzeugen.

Als der entscheidende Zeitpunkt des ersten Flugversuchs gekommen ist, macht der Wind auf dem Schulhof die Vorführung unmöglich, und man zieht in den Klassenraum um. Dort ist die Gruppe einen Augenblick unachtsam, und schon fängt der Ballon Feuer. Das leicht entzündliche Seidenpapier verkohlt schnell, und ein Ascheregen geht auf die erstaunten Schüler nieder. »Fehler sind erlaubt«, meint einer der Betreuer, der Mathematik- und Physiklehrer Norbert Großberger, dazu.

Hervorgegangen ist die Gruppe aus einer seit 1993 bestehenden Physik-AG am Grimmelshausen-Gymnasium Gelnhausen. Die Arbeitsgemeinschaft von Norbert Großberger und seinem Kollegen Erwin Bernhardi, die bislang eher unregelmäßig getagt hatte, erhielt neuen Auftrieb durch den Kontakt mit dem »Zentrum für Mathematik und Literatur« am selben Ort (Kasten rechts). Dessen Gründerin Bettina Mähler begeisterte die Lehrer für das Konzept des Maristengymnasiums in Fürstenzell bei Passau, das seit Langem Erfinden als Unterrichtsfach hat, und sorgte dafür, dass das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technik (BMBF) finanzielle Fördermittel bereitstellte. So wurde aus dem Projekt der INSTI-Erfinderclub (Kasten S. 80).

Im Durchschnitt hat die Arbeitsgemeinschaft 15 Mitglieder pro Schuljahr. Neben Oberstufenschülern, die zum Beispiel nach einem geeigneten Umfeld für eine Teilnahme bei »Jugend forscht« suchen, können auch schon jüngere Schüler ab der 9. Klasse Mitglied im Erfinderclub werden.

»Im Erfinderclub finden die Schüler Raum für eigene Projekte, für die im Unterricht kein Platz ist«, erklären Norbert Großberger und Erwin Bernhardi das Konzept. »Und vor allem: Physik soll Spaß machen!« Anstelle der herkömmlichen Lehrerrolle haben die beiden Pädagogen somit beratende und unterstützende Funktion für die Ideen der Schüler. Sie stehen den Gruppen mit Rat und Tat zur Seite, übernehmen aber nicht das Kommando.

Physik soll Spaß machen!

Der Zugang zur Physik liegt hier nicht in der Theorie, die Schüler meist als abschreckend oder langweilig empfinden, sondern in der Praxis. »Rumbasteln und Neues ausprobieren ist cool«, erklärt ein Schüler. Nicht selten holen sich die Jugendlichen Anleitungen aus dem Internet und entwickeln sie weiter. Oder sie

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Hoffnungsfroher Anfang und trauriges Ende eines selbst entwickelten Heißluftballons

Das Zentrum für Mathematik und Literatur Gelnhausen

Ausgelöst durch jahrelange Anfragen von Eltern nach Zusatzangeboten für begabte Kinder und Jugendliche, gründete die Pädagogin und Buchautorin Bettina Mähler im November 2002 eine Einrichtung, die außer Kursen für Hochbegabte auch Beratung und Elternseminare anbietet. Mittlerweile ist das »Zentrum für Mathematik und Literatur Gelnhausen« eines von fünf Instituten, die vom Trägerverein Zentrum für Mathematik e. V. in Bensheim unterhalten werden. Dessen Programm, das ursprünglich der Förderung der Mathematik vorbehalten war, wurde – unter anderem durch die Initiativen in Gelnhausen – inzwischen auf die Bereiche Literatur, Physik und Chemie ausgedehnt.

Die Buchreihe »Eins Plus« (Cornelsen Scriptor Verlag), herausgegeben von Bettina Mähler und Michael Meyer, dem Vorstandsvorsitzenden des Trägervereins, bietet Materialien für den Unterricht von begabten Schülern. Die Themen sind Mathematik und Literatur für verschiedene Altersstufen.

http://www.z-f-m.de

entwerfen selbst Experimente – sonst Aufgabe der Lehrer. Die Schüler sagen: »Wir experimentieren viel, aber nicht sinnlos.« Ganz ohne Theorie geht es doch nicht; deshalb darf man erst nach zwei Jahren regulären Physikunterrichts am Erfinderclub teilnehmen.

Eine Vielzahl der Teilnehmer wählt Physik als Leistungskurs und später als Studienfach. Außerdem, gesteht Erwin Bernhardi schmunzelnd, lerne er selbst auf Grund der zum Teil ungewöhnlichen Problemstellungen auch noch etwas dazu.

Idealismus ist erforderlich: Bislang erhalten die beiden Lehrer für ihre Arbeit weder zusätzliches Gehalt noch zeitlichen Ausgleich. Immerhin soll das Projekt ab dem nächsten Schuljahr auch – in Form von Entlastungsstunden – vom Schulamt gefördert werden.

Auch ohne Notengebung stehen die Schüler unter einem gewissen Druck, das behandelte Thema richtig zu verstehen. Man will sich ja nicht blamieren, wenn man schulintern und auch bei öffentlichen Wettbewerben das eigene Projekt vorstellt. In diesem Jahr nehmen zwei Gruppen unseres Erfinderclubs bei »Jugend forscht« und eine jüngere Gruppe bei »Schüler experimentieren« teil (Bilder S. 81). Im Regionalwettbewerb Hessen-Mitte gab es am 17. Februar bereits zwei erste Preise – mit Qualifikation zur Teilnahme am Landeswettbewerb – und einen zweiten Preis.

Reine Mädchensache: Radioaktivität

Meine Freundinnen Luisa Ickes und Franziska Metzler fanden den Anstoß zum Thema Radioaktivität, als sie während eines Praktikums an einem Messplatz zur Gamma-Spektroskopie arbeiteten. Ich selbst stieß auf das Thema in meinem Leistungsfach Chemie. Wir drei taten uns zusammen und stellten uns unter dem Motto »Dem Radon auf der Spur« die Aufgabe, die meist sehr geringe natürliche Radioaktivität in der Umgebungsluft mit schulischen Mitteln nachzuweisen.

Radioaktives Uran, das in der Natur in manchen Gesteinen vorkommt, zerfällt über verschiedene Zwischenprodukte in das radioaktive Edelgas Radon-222. Dieses gelangt durch Diffusion und Konvektion in die Luft, wo es sich vor allem in geschlossenen Räumen anreichern kann. In gewissen Regionen stellt dies eine nicht unerhebliche Belastung für den menschlichen Organismus dar.

Den Nachweis des Edelgases Radon führen wir mit Hilfe der Hochspannungsmethode. Hierfür spannen wir einen fünf Meter langen Draht in die Luft, der an den negativen Pol einer Fünf-Kilovolt-Hochspannungsquelle angeschlossen ist. Da bei radioaktiven Zerfällen Elektronen aus der Atomhülle geschlagen werden, sind die radioaktiven Partikel positiv geladen. Sie lagern sich gemeinsam mit Staub und positiv geladenen Aerosolen an dem Draht an. Nach dem Ende der Messzeit wickeln wir den Draht auf und stecken ihn in einen Szintillationszähler, mit dem wir die Radioaktivität der Partikel bestimmen.

Das Zählergebnis zeigt für die Gammastrahlung markante Peaks in den für Radon-222 typischen Energiebereichen. Somit ist Radon-222 nachgewiesen. Vergleichsmessungen mit dem professionellen Radonmessgerät »Alpha Guard«, das uns die Firma Genitron freundlicherweise zur Verfügung stellte, belegen, dass die ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



Makroskopisches Modell einer Paul-Falle

Eine echte Paul-Falle, deren Zentrum nicht größer als ein Millimeter ist, hält Ionen durch ein elektrisches Wechselfeld im Raum gefangen und macht sie dadurch genauesten Untersuchungen zugänglich. Auf Grund dieser Möglichkeit ist die Paul-Falle einer der Meilensteine auf dem Weg zum Quantencomputer. Sie ist auch für die Entwicklung und den Betrieb modernster Atomuhren unerlässlich geworden. Urvater der Erfindung ist Wolfgang Paul, der die Falle in den 1950er Jahren entwickelte und dafür 1989 den Nobelpreis für Physik verliehen bekam (Spektrum der Wissenschaft 12/1989, S. 14).

Um dieses Prinzip auch dem Schulunterricht zugänglich zu machen, baute Christian Schickedanz ein makroskopisches Modell der Falle nach. Das Gefängnis mit den unsichtbaren elektrischen Wänden ist in seinem Fall etwa so groß wie ein Zwei-Euro-Stück und fasst geladene Teilchen von der Größe eines Staubkorns. Im Experiment werden Bärlappsporen verwendet, welche von einem Neodymlaser beleuchtet werden, sodass sie mit bloßem Auge gut sichtbar sind.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Wie gründe ich einen INSTI-Erfinderclub?

Man nehme einen oder besser zwei engagierte Lehrer/innen; diese geben den Impuls für die Gründung eines Erfinderclubs und machen die Konzeption publik. Melden sich genügend interessierte Schülerinnen und Schüler (Minimum 10), bewirbt sich die Schule bei dem INSTI-Projektmanagement (INSTI steht für »Innovationsstimulierung«), das beim Institut der deutschen Wirtschaft in Köln angesiedelt ist.

Deutschlandweit gibt es 155 INSTI-Erfinderclubs mit insgesamt 4000 Mitgliedern jedes Alters. Damit ist die Gesamtheit der Clubs Deutschlands größtes Netzwerk für Erfindungen und Patentierung. Etwa die Hälfte der Clubs ist Kindern und Jugendlichen vorbehalten.

Ziel des Netzwerks ist die Kreativitätsförderung und die Verwirklichung und Vermarktung von Ideen. Insbesondere geht es um die Förderung mathematisch und naturwissenschaftlich begabter und interessierter Schüler. Darüber hinaus sollen Fähigkeiten wie Problemlösestrategien und Teamfähigkeit vermittelt werden.

Aus Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technik erhält jeder INSTI-Erfinderclub pro Jahr bis zu 750 Euro für die Clubarbeit. Davon sind 250 Euro zunächst gesperrt und werden erst ausgezahlt, wenn der Erfinderclub Sponsorengelder in mindestens gleicher Höhe eingeworben hat.

Das INSTI-Projektmanagement unterstützt zusätzlich die Teilnahme an weiteren Aktionen, wie Marketingschulungen, Seminaren und Erfahrungsaustauschtreffen.

Bewerbungsunterlagen finden sich im Internet unter www.erfinderclubs.de > Erfinderclubs unter sich > Club-Leiter-Ecke

Institut der deutschen Wirtschaft Köln
Gustav-Heinemann-Ufer 84 – 88
50968 Köln
E-Mail: treu@iwkoeln.de

▷ Hochspannungsmethode zuverlässige Ergebnisse liefert. Außerdem untersuchten wir die Quellen erhöhter natürlicher Radioaktivität in Privathaushalten. Das können neben schlechten Abdichtungen in Kellerböden und -wänden bestimmte Baumaterialien sein.

Blitze für den Stickstofflaser

Eine Gruppe von vier Oberstufenschülern setzte sich das Ziel, einen Laser aus leicht zugänglichen Materialien zu bauen. Matthias Ungermann, Nico Seib, Sebastian Zander-Walz und Henning Heggen griffen dabei auf das billigste und einfachste Medium zurück, das es gibt: Stickstoffgas, den Hauptbestandteil der Luft. »Diesen Versuch führen normalerweise Studenten an Universitäten durch«, erklärt Norbert Großberger. »Er erfordert viel Fingerspitzengefühl. Ich glaubte nicht unbedingt an den Erfolg des Experiments.« Doch das Team um Matthias Ungermann belehrte ihn eines Besseren: Der im ultravioletten Licht strahlende Stickstofflaser funktionierte perfekt.

Die Bauteile des Lasers – eine metallische Grundplatte, zwei weitere kleine Platten mit einer Einkerbung und eine Spule – stellten die Schüler aus ebenfalls leicht zugänglichen Materialien her: Aluminiumblechen und Kopierfolie. Zwischen zwei dicht benachbarten Blechplättchen legten sie eine elektrische Hochspannung an. Durch Funkenüberschläge (»Blitze«) werden Stickstoffmoleküle in der Luft angeregt, das heißt, Elektronen aus der Atomhülle von ihrem Grundzustand in einen angeregten Zustand versetzt. Beim Zurückfallen in den Grundzustand emittiert ein Atom ein Photon, das seinerseits andere angeregte Atome zur Emission eines Photons veranlasst. Das ist das Funktionsprinzip des Lasers: die stimulierte Emission.

Durch Interferenzversuche mit einem Rowland-Gitter fanden die Schüler heraus, dass die Wellenlänge des von dem Laser erzeugten monochromatischen Lichts zirka 337 Nanometer beträgt.

Abhörsicher: optischer Datentransfer

Matthias Ungermann, Alexander Kalweit und Johannes Coy versuchten, eine Alternative für den Datentransfer zwischen zwei Computern zu entwickeln. Ihr Ansatz: Daten in Tonsignalen kodieren und diese optisch übertragen. »Es standen von Anfang an weniger die in-

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Sebastian Binder, Malte Volkwein und Sascha Gourdet (linkes Bild) kamen im Regionalwettbewerb von »Schüler experimentieren« auf den ersten Platz mit einer Untersuchung über die Effizienz einer Photovoltaikanlage. Luisa Ickes, die Autorin Kathrin Schlößler (Mitte im rechten Bild) und Franziska Metzler erhielten im Regionalwettbewerb von »Jugend forscht« einen ersten Preis für Untersuchungen zur natürlichen Radioaktivität.

formationstechnischen, sondern vielmehr die physikalischen Fragestellungen im Vordergrund«, erklärt das Team. Die Realisierung gelang mit einer Soundkarte und einer Lichtleiterstrecke. »Zwar ist die Übertragungsgeschwindigkeit noch gering«, stellten die Tüftler fest, »doch der Steigerung der Datenrate stehen keine gravierenden physikalischen Probleme im Weg.« Im Gegensatz zum herkömmlichen Kupferkabel ist ihre Datenübertragung abhörsicher. »Glasfasern strahlen nicht ab.«

Mit diesem Konzept kamen sie beim Wettbewerb »Jugend forscht« bis auf einen dritten Platz im Landeswettbewerb Hessen und erhielten weitere Auszeichnungen. Wären sie weitergekommen, hätten sie versucht, auch den Lichtleiter noch wegzulassen und die Signale mit Hilfe einer Laserdiode direkt durch die Luft zu transportieren.

Leider konnten sie die Erfindung nicht patentieren lassen, denn das Verfahren wurde unabhängig von ihnen bereits einige Jahre zuvor in den USA entwickelt. Alle Beteiligten studieren mittlerweile Physik.

Donnern mit dem Tesla-Transformator

Man erzeuge mittels einer Funkenstrecke eine hochfrequente Wechselspannung, die durch ein Spulenpaar auf ungefähr 300 000 Volt hochtransformiert wird. Das ist das Prinzip des Tesla-Transformators, benannt nach Nicola Tesla (1856 – 1943), einem Pionier der Elektrotechnik.

Tesla-Transformatoren gibt es zwar auch im Versandhandel, doch einen mit schulischen Mitteln herzustellen ist eine Herausforderung. Das Gerät muss sehr präzise gearbeitet und geplant werden.

Dem Team von Christoph Böttge und Stefan Höflich gelang das in spektakulärer Weise. Ihr Tesla-Transformator ist größer, aber kostengünstiger als käufliche Produkte und erzeugt im Gegensatz zu diesen Blitze von mehr als 30 Zentimetern Länge. Im abgedunkelten Physikraum mit dem zugehörigen Donner ergibt das einen höchst eindrucksvollen Knalleffekt!

Neben dem »Standardprogramm« ermöglichte der INSTI-Erfinderclub Gelnhausen seinen Mitgliedern eine unerwartete Unternehmung. Aus Anlass des 40-jährigen Bestehens des Elysée-Vertrags mit Frankreich hatte die französische Ministerin für »Recherche et Nouvelles Technologies« (Wissenschaft und neue Techniken), Claudie Haigneré, insgesamt 100 deutsche Schüler nach Frankreich eingeladen. Die »Fête de la science« fand vom 15. bis 19. Oktober 2003 in mehreren französischen Städten, darunter Paris und Bordeaux, statt. Vier Gelnhäuser Erfinderclubmitglieder bewarben sich um die Teilnahme und wurden ausgewählt (für ganz Hessen gab es nur 15 Plätze). Das Fest war – mit zahlreichen Besuchen in Museen, Universitäten und Firmen – ein »einmaliges Erlebnis«, so Erwin Bernhardi, der die Gruppe aus Hessen begleitete. Zum Spaß kam die Gelegenheit hinzu, Kontakte zu knüpfen, die zum Beispiel auf Praktika in französischen Instituten hinauslaufen.

Die anfangs geschilderte Flugobjekt-Gruppe hat sich übrigens von ihrem Fehlschlag nicht entmutigen lassen. Nachdem Erwin Bernhardi den Kreativen eine petroleumgetriebene Rakete rechtzeitig ausgeredet hatte, wandten sie sich einem anderen Element zu: dem Wasser. Sie haben selbst berechnet, wie schwer eine Wasserrakete sein darf, und untersucht, welches Material sich dafür eignet. Gespannt versammelt sich die Gruppe um die in mühseliger Arbeit erbaute Rakete. Erinnerungen an den missglückten Versuch sind den nervösen, beunruhigten Gesichtern anzusehen.

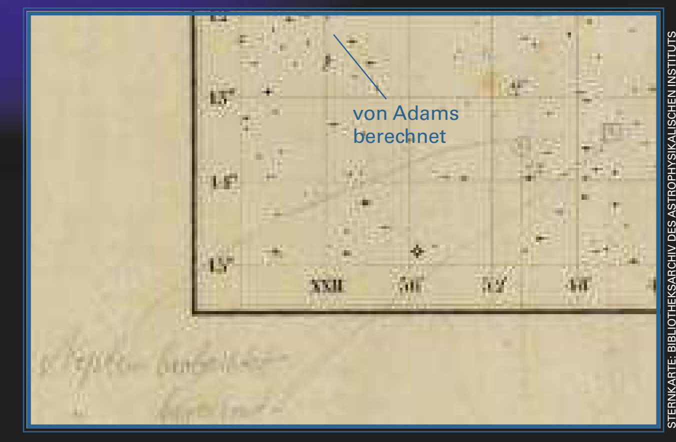
Ein Gruppenmitglied pumpt Luft in das Gefäß. Durch die Reaktion von Natriumhydrogenkarbonat mit Essigsäure im Wasser entsteht Kohlendioxid und verstärkt den Druck. Fuschhh! Und die Rakete rauscht davon. Mindestens 30 bis 40 Meter hoch. Das Experiment ist gelungen! ◁

Kathrin Schlößler steht kurz vor dem Abitur am Grimmelshausen-Gymnasium in Gelnhausen.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Neptun-Affäre

Die Ereignisse, die zur Entdeckung des Planeten Neptun führten, tauchen in fast jedem Astronomiebuch auf. Doch jüngst aufgefundene Originaldokumente legen den Schluss nahe, dass die bisherige Version der Geschichte geändert werden muss.



Triumph der Himmelsmechanik: Diese Sternkarte aus dem Himmelsatlas der Berliner Akademie half den Astronomen Johann Galle und Heinrich Louis d'Arrest, in der Nacht des 23. September 1846 den Planeten Neptun zu entdecken. Die Notiz (vermutlich von Galles Hand) markiert die Entdeckungsposition und die von dem französischen Astronomen Urbain Jean Joseph Le Verrier berechnete Position. Wie sich später herausstellte, hatte auch der Engländer John Couch Adams den Planeten in diesem Himmelsareal vermutet.

STERNKARTE: BIBLIOTHEKSARCHIV DES ASTROPHYSIKALISCHEN INSTITUTS POTSDAM; NEPTUN: NASA/JPL

Von William Sheehan, Nicholas Kollerstrom und Craig B. Waff

Dieser Stern ist nicht auf der Karte!« Der Ausruf des Astronomiestudenten Heinrich Louis d'Arrest (1822–1875) hallte in der Nacht des 23. September 1846 durch die Kuppel der Berliner Sternwarte. Sein Nachhall klang in allen astronomischen Einrichtungen fort.

Ausgerüstet mit einer Sternkarte auf dem Tisch vor sich, half d'Arrest dem Astronomen Johann Gottfried Galle (1812–1910), eine erstaunliche Vorhersage des Mathematikers Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811–1877) zu überprüfen. Der Franzose hatte die Hypothese aufgestellt, dass die Bahn des damals fernsten bekannten Planeten, Uranus, durch die Gravitation eines noch unbekannten Himmelskörpers gestört werde. Fünf Tage zuvor hatte er an Galle geschrieben: »Sie werden sehen, Monsieur, dass ich zeige, wie unmöglich es ist, die Beobachtungen des Uranus zu erklären, ohne die Wirkung eines neuen, bis dahin unbekannten Planeten einzuführen; bemerkenswerterweise gibt es nur einen einzigen Ort in der Ekliptik, wo dieser störende Planet lokalisiert werden kann.«

»Planetgate«

Nach nur einer halben Stunde Beobachtung stieß Galle innerhalb von einem Grad Abstand zur vorhergesagten Position auf ein kleines, blaues Scheibchen. Als er den Himmelskörper in der folgenden Nacht erneut beobachtete, hatte er sich etwas verschoben – ein sicheres Zeichen, dass es sich um keinen Stern handelte. Galle schrieb umgehend an Le Verrier: »Den Planeten, dessen Position Sie angegeben haben, gibt es wirklich!«

Diese Geschichte aus mathematischer Detektivarbeit und raschem Auffinden des Planeten, für den Le Verrier den Namen Neptun vorschlug, ist eine der bekanntesten in der Astronomie. Ebenso berühmt ist der Streit, der kurz nach Galles Bekanntmachung der Entdeckung einsetzte. Es stellte sich nämlich heraus, dass ein junger englischer Mathematiker, John Couch Adams (1819–1892), unabhängig von Le Verrier dasselbe Problem gelöst und eine fast identische Position für Neptun abgeleitet hatte – und zwar früher als Le Verrier.

Französische Astronomen reagierten darauf mit Skepsis. Aber ein Bericht, den der britische Astronom George Biddell Airy (1801–1892) am 13. November 1846 der Königlichen Astronomischen Gesellschaft (Royal Astronomical Society, RAS) vorlegte, schien Adams Anspruch zu stützen. Airy bestätigte darin, dass er tatsächlich im Herbst 1845 von Adams eine prognostizierte Position erhalten hatte und dass er im darauf folgenden Sommer eine Suche nach dem Planeten eingeleitet hatte. Adams und Le Verrier wurde daraufhin der gleiche Anteil an der Entdeckung zugesprochen.

Wenn diese berühmte Geschichte später nacherzählt wurde, dann meistens ohne Überprüfung von Airys Bericht. Die Protagonisten Le Verrier, Adams, Airy sowie James Challis (1803–1882) – jener Astronom der Universität Cambridge, der die britische Suche durchführte – hatten ihre festen Rollen: Adams, der scheue, widerstrebende Held, den ein Fachjournal der RAS damals als Englands »größten mathematischen Astronomen ... mit Ausnahme von Newton« bezeichnete; er und Le Verrier hätten sich über den internationalen Zwist hinweggesetzt und seien Freunde geworden. Challis wurde für die vermasselte Suche in England verantwortlich gemacht. Und schließlich Airy, der als Inbegriff eines Bürokraten galt und die Sternwarte Greenwich offenbar wie ein Tyrann leitete.

Im Lauf der Jahre haben mehrere Historiker diese Sichtweise hinterfragt. Einer der ersten war vor einem halben Jahrhundert der britische Astronom William M. Smart, der eine Sammlung von Adams' wissenschaftlichen Veröffentlichungen übernommen hatte. Ende der 1980er Jahre stießen Allan Chapman von der Universität Oxford und Robert W. Smith, damals an der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland), auf weitere wichtige Dokumente. Und der Astronomiehistoriker Dennis Rawlins aus Baltimore, der sich seit Ende der 1960er Jahre mit dem Thema beschäftigt, geht sogar so weit zu behaupten, britische Astronomen hätten im 19. Jahrhundert den Airy-Bericht absichtlich gefälscht oder zumindest aufgepeppt.

Diese Zweifel hätten aus der Welt geschafft werden können, wenn Historiker Zugang zu den Dokumenten gehabt hätten, auf die Airy sich bezog. Doch seit Mitte der 1960er Jahre beantworteten Bibliothekare der Sternwarte Greenwich entsprechende Anfragen mit dem Hinweis, die Akten wären »nicht verfügbar«. Ihr Verbleib bildete ein ähnliches Rätsel wie die Neptun-Affäre selbst. Wie konnten Dokumente, die mit einem der glorreichsten Ereignisse der Astronomiegeschichte verbunden sind, einfach fehlen?

Rawlins und die Mitarbeiter der Bibliothek vermuteten, dass sich die Unterlagen im Besitz des Astronomen Olin J. Eggen befanden, der Anfang der 1960er Jahre Hauptassistent des Königlichen Astronomen gewesen war. Er hatte sie als Letzter ausgeliehen, um Biografien über Airy und Challis zu schreiben. Aber Eggen, der zunächst nach Australien und später nach Chile zog, behauptete stets, er besitze die Dokumente nicht. Die Bibliothekare übten keinen allzu großen Druck auf ihn aus, denn sie fürchteten, Eggen könnte die Unterlagen ansonsten vernichten, um Spuren zu verwischen.

Das Rätsel blieb mehr als 30 Jahre ungelöst. Als Eggen am 2. Oktober 1998 starb, fanden Kollegen in seiner Wohnung die vermissten Unterlagen (zusammen mit weiteren wertvollen Büchern aus der Greeenwich-Bibliothek). Sie verpackten die mehr als 100 Kilogramm schweren Materialien in zwei Kisten und schickten sie an die Bibliothek in Cambridge, wo sich das Greenwich-Archiv heute befindet. Durch diese glückliche Entdeckung – in Verbindung mit weiteren Dokumenten aus anderen Archiven – war es uns möglich, Neptuns Entdeckungsgeschichte erneut zu untersuchen.

Rätselhafte Kursabweichung

Fünf Planeten unseres Sonnensystems sind bereits leicht mit bloßem Auge zu sehen und darum schon seit alters her bekannt: Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn. Der erste mit einem Teleskop aufgefundene Planet war Uranus. In der Nacht des 13. März 1781 entdeckte ihn der deutsch-englische Astronom William Herschel, als er den Himmel systematisch mit einem selbst gebauten Spiegelteleskop durchforstete. Im Sternbild Zwillinge stieß er auf ein winziges, gelbgrünes Scheibchen, das er dort noch nicht gesehen hatte. Handelte es sich möglicherweise um einen Kometen? Weitere Beobachtungen und Berechnungen von anderen Astronomen ergaben jedoch schnell, dass Herschels Objekt kein Schweifstern sein ▷

konnte. Denn ein solcher hätte sich auf einer stark elliptischen Umlaufbahn bewegt. Die fast kreisförmige Bahn war hingegen ein Beleg dafür, dass es sich um einen echten Planeten handelte, und zwar einen, der in der doppelten Entfernung des Saturns die Sonne umrundete.

Astronomen faszinierte die Vorstellung, dass es in unserem Sonnensystem eine weitere eigenständige Welt gab. Damit hatte niemand gerechnet. Als sie frühere Sternverzeichnisse studierten, erkannten sie, dass der Planet – vom deutschen Astronomen Johann Elert Bode (1747–1826) »Uranus« genannt – vor 1781 bereits zwanzig Mal beobachtet worden war. Die älteste dokumentierte Beobachtung ging auf das Jahr 1690 zurück. Aber jedes Mal hatte man Uranus irrtümlich für einen Stern gehalten.

Im Jahr 1821 stellte der französische Astronom Alexis Bouvard (1767–1843) alle Beobachtungen zusammen und stieß auf ein Problem: Selbst wenn er die gravitativen Einflüsse der Riesenplaneten Jupiter und Saturn berücksichtigte, lieferten die Berechnungen andere Uranuspositionen als die tatsächlich beobachteten. Stimmten vielleicht die von Kepler und Newton abgeleiteten Gesetze der Planetenbewegung nicht? Durchzog den Weltraum ein Medium, das die Planeten bremste? Oder wurde Uranus durch einen weiteren, unbekannten Himmelskörper beeinflusst? Dieses Problem war im 19. Jahrhundert von ähnlicher Dimension wie die Frage nach der Dunklen Materie, die heutige Astronomen beschäftigt.

Der deutsche Astronom Friedrich Wilhelm Bessel (1784–1820) wollte sich der Fragestellung annehmen, starb allerdings, bevor er viel erreichen konnte. Die erste vollständige Analyse veröffentlichte Le Verrier am 1. Juni 1846 im Journal der französischen Akademie der Wissenschaften. Darin sagte er einen Transuranus bei einer mittleren Länge – die Position, wie man sie von einem hypothetischen Aussichtspunkt oberhalb des Sonnensystems aus sähe – von 325 Grad für den 1. Januar 1847 voraus (siehe Grafik S. 87). Diese Ausgabe des Journals kam Ende Juni bei Airy in England an, und er erinnerte sich daran, dass er ein ähnliches Ergebnis im vergangenen Herbst gelesen hatte. Ein Mitglied des St. John's College der Universität Cambridge hatte es ihm auf einem unscheinbaren Stück Papier übergeben.

Adams – ein zweiter Newton?

Der Name des jungen Mannes war John Couch Adams. Zwischen seinem Leben und dem von Isaac Newton gibt es einige Parallelen. Beide wuchsen auf dem Land auf – Newton als Sohn eines des Lesens und Schreibens unkundigen Kleinbauern in Lancashire, Adams als Sohn eines Farmers in Cornwall, der die Pacht für den Hof in Naturalien beglich. Sowohl Newton als auch Adams interessierten sich bereits in jungen Jahren für Mathematik und Naturphänomene. Beispielsweise dokumentierten beide den Lauf der Sonne im Laufe eines Jahres, indem sie Markierungspflöcke in den Boden schlugen oder Kerben in Fenstersimse ritzten. Beiden sagt man ähnliche Eigenschaften nach: Abstinenz, Pedanterie und Zweifel an der Religion. Zeitgenossen beschrieben beide als verträumt, exzentrisch und geistig abwesend. Sowohl bei Newton als auch bei Adams würde man heute womöglich das Asperger-Syndrom diagnostizieren, eine Form des Autismus, die vor allem bei besonders intelligenten Kindern auftritt.

Adams wurde am 5. Juni 1819 geboren. Im Alter von zehn Jahren hatte er solch ein außergewöhnliches mathematisches Talent entwickelt, dass ein Bekannter ihn als Genie bezeichnete und Adams' Vater empfahl, »lieber den eigenen Hut zu verkaufen, als den Jungen nicht aufs College zu schicken«. Adams las alle Bücher über Astronomie und Mathematik, deren er habhaft werden konnte, und berechnete als Jugendlicher die Ortszeit für eine Sonnenfinsternis, die in Cornwall zu sehen war – keine triviale Aufgabe ohne Taschenrechner und Computer. Er beobachtete den Nachthimmel, während er an einem uralten keltischen Kreuz lehnte, das in der Nähe seines Elternhauses stand, aber seine schlechten Augen verhinderten eine Karriere als Astronom. Die zufällige Entdeckung eines Manganklümpchens auf dem Farmgelände – Mangan wurde damals für die Stahlerzeugung benötigt – ebnete schließlich Adams' Weg aus der Armut an die Universität.

Sofort nachdem er 1839 in Cambridge angekommen war, wurde seine ungewöhnliche Begabung deutlich. »Ich war verzweifelt«, erinnerte sich sein Studienkollege A. S. Campbell, »weil ich mit sehr großen Hoffnungen nach Cambridge gekommen war – aber der erste Mensch, der mir dort begegnet, ist mir gleich so unendlich weit überlegen.« Adams heimste alle Mathematikpreise ein, welche die Universität zu vergeben hatte. Andererseits wirkte Adams vergesslich, fast körperlos. Ein Student erinnerte sich an ihn als »einen ziemlich kleinen Mann, der schnell ging und einen ausgeblichenen, dunkelgrünen Mantel trug«. Adams' Zimmerwirtin »fand ihn manchmal auf dem Sofa liegend, ohne Bücher oder andere Unterlagen; nicht selten ... war der einzige Weg, seine Aufmerksamkeit zu bekommen, wenn ich zu ihm hinging und seine Schulter berührte; bloßes Rufen half nichts«.

Im Juli 1841, nach der Hälfte seines Studiums, stieß Adams in einer Cambridger Buchhandlung auf Airys »Report on Progress of Astronomy«. Diese wissenschaftliche Veröffentlichung aus dem Jahr 1832 schilderte die zunehmenden Abweichungen des Uranus von seiner vorausberechneten Bahn. Nach der Lektüre schrieb Adams in sein Tagebuch:

Gestaltete einen Entwurf ... für die Untersuchung der Unregelmäßigkeiten in der Uranusbewegung, die noch nicht erklärbar sind, um herauszufinden, ob sie durch einen noch nicht entdeckten Planeten jenseits des Uranus verursacht werden. So schnell wie möglich nach dem Abschluss angehen.

IN KÜRZE

- Vor 200 Jahren rätselten die Astronomen: Waren **Abweichungen des Planeten Uranus** von seiner vorausberechneten Bahn auf einen noch unbekannten Himmelskörper am Rand des Sonnensystems zurückzuführen?
- Nachdem der Berliner Astronom Johann Gottfried Galle 1846 den Planeten Neptun entdeckt hatte, reklamierten zwei Theoretiker für sich, die **Position des fernen Himmelskörpers** vorausberechnet zu haben: der Franzose Urbain Jean Joseph Le Verrier und der Engländer John Couch Adams.
- Die Rolle von Le Verrier war **von Anfang an unumstritten**. Doch Historiker zogen den Beitrag von Adams zur Entdeckung des Neptuns seit den 1950er Jahren in Zweifel. Erst mit dem Auftauchen verschollener Dokumente ließen sich diese Bedenken nun erhärten.

ADAMS UND AIRY: NATIONAL MARITIME MUSEUM LONDON; LE VERRIER: OBSERVATOIRE DE PARIS


John Couch Adams


Urbain Jean Joseph Le Verrier


George Biddell Airy

Während der folgenden fünf Jahre betrachtete Adams das Problem der Uranusbewegung offenbar als eine Art Hobby. Es schien nicht dringlich zu sein, da eine Lösung ja schon Jahre auf sich warten ließ. Nach seinem Abschluss im Jahr 1843 beschaffte er sich Beobachtungsdaten über den Uranus von Challis: Dessen Sternwarte war nur einen Fußmarsch vom St. John's College entfernt. Da er als Tutor sehr beschäftigt war, machte sich Adams während eines Urlaubs in Cornwall an seine Berechnungen. Sie waren mühselig, aber er genoss solche Dinge.

Ein einzelnes Blatt als Nachweis

Als erste Näherung nahm Adams an, dass die mittlere Entfernung des gesuchten Planeten der Titius-Bode-Regel folge und mit 38 Astronomischen Einheiten doppelt so groß sei wie diejenige des Uranus. Die von Johann Daniel Titius (1729–1796) aufgestellte und von Bode allgemein bekannt gemachte empirische Regel beschrieb alle Abstände der bekannten Planeten. Indem Adams verschiedene Werte für die Bahnparameter eines hypothetischen Planeten ausprobierte, versuchte er die Residuen – die Abweichungen zwischen den berechneten und beobachteten Uranuspositionen – durch eine Abfolge weiterer Näherungen zu verringern. Diese Methode ist als Störungstheorie bekannt und entwickelte sich später zu einer tragenden Säule der mathematischen Physik.

Mitte September 1845 schien er Challis über die Ergebnisse seiner Berechnungen, an denen er den ganzen Sommer gearbeitet hatte, informiert zu haben. Aber auf welche Art tat er das? Viele Historiker sind zu dem Schluss gekommen, dass ein einzelnes Blatt in Adams' Akten diesen Zweck erfüllte: Es bezieht sich auf »den neuen Planeten« und trägt Challis' handschriftlichen Vermerk »empfangen im September 1845«. Aber diese Schlussfolgerung ist umstritten, denn der Ausdruck »neuer Planet« war damals noch nicht geläufig.

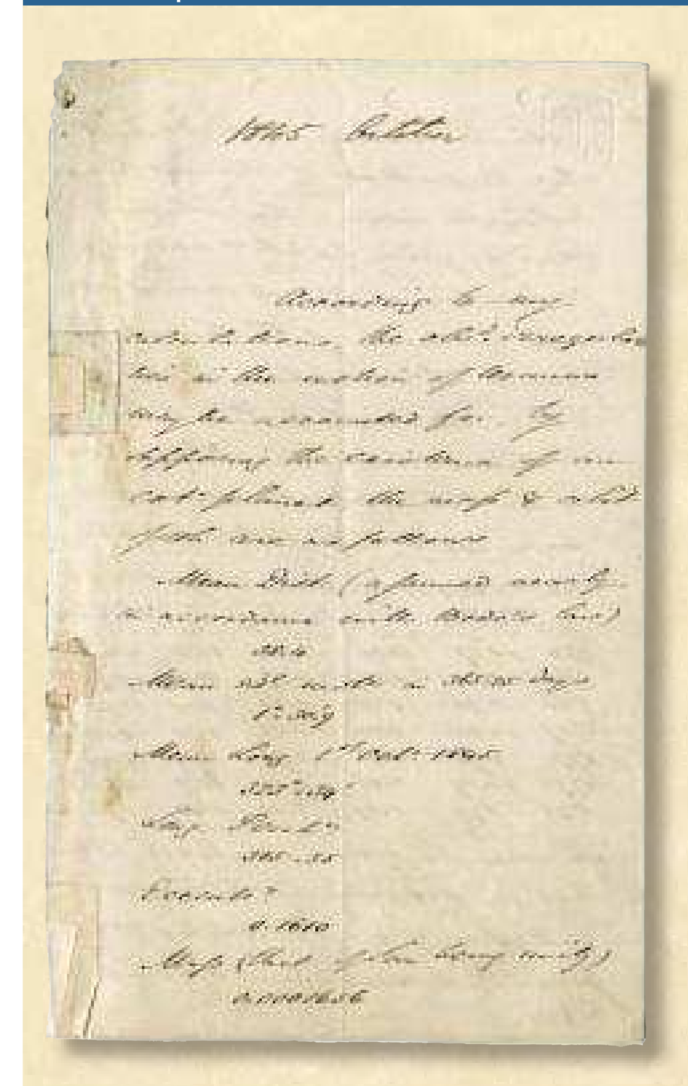
Es ist also keineswegs gesichert, ob Adams seine Ergebnisse Challis überhaupt schriftlich mitgeteilt hat; wenn er es tat, dann sind diese Unterlagen womöglich verloren gegangen. Angesichts ihrer oberflächlichen Kommunikation überrascht es nicht, dass Challis keine Motivation verspürte, den Nachthimmel systematisch abzusuchen. Er zweifelte, ob die Störungstheorie die Planetenpositionen überhaupt genau genug vorhersagen könne und erklärte später, dass »nur die Arbeit, aber nicht der Erfolg gewiss war«. Dennoch informierte er Airy darüber, dass Adams einige Berechnungen angestellt hatte.

Adams entschloss sich, Airy aufzusuchen, und zwar am Ende einer Urlaubsreise auf seinem Weg von Cornwall nach Cambridge. Allerdings hatte er sich nicht angemeldet, und so verlief sein Besuch an Airys Wohnsitz in Greenwich Hill am 21. Oktober 1845 erfolglos. Die beiden begegneten sich nie. Spätere Berichte machten den Butler dafür verantwortlich, weil der es versäumt habe, Adams' Visitenkarte vorzulegen; doch ein jüngst entdeckter Brief von Airys Ehefrau entlastet den Bediensteten. In dem Schreiben erinnerte sie sich, dass die Karte tatsächlich vorgelegt worden war, aber Airy nicht zu Hause weilte.

Adams ließ für Airy einen Zettel zurück. Auf dieses entscheidende Dokument stützt sich die These der britischen Entdeckung (siehe Kasten S. 86). Die Notiz nannte die Bahnelemente des hypothetischen Planeten. Die Bahn wich deutlich von einem idealen Kreis ab, und die mittlere Länge sollte für den 1. Oktober 1845 genau 323 Grad und 34 Minuten betragen. Hätte jemand an diesem Tag die Umgebung jener Stelle abgesucht, wäre er in etwa zwei Grad Abstand auf Neptun gestoßen. Dies unterscheidet sich nicht wesentlich von der Genauigkeit, die Le Verriers Vorhersage hatte.

Die Notiz enthielt außerdem eine Reihe mit Residuen in der Größenordnung von einer Bogensekunde, mit denen Adams zeigen wollte, dass seine Theorie die bislang unverstandene Bewegung ▷

Die Neptun-Akten



Die Akten enthalten diese Notiz, auf die sich die Behauptung stützte, John Couch Adams habe als Erster die Existenz des Planeten Neptun und seine Position vorhergesagt. Das Blatt warf Adams im Oktober 1845 in den Briefkasten des Königlichen Astronomen George Biddell Airy. Auf ihm stehen zwar Ergebnisse, aber keine Einzelheiten der Rechnung.



Lange verschollene Originaldokumente tauchten 1998 wieder auf. Der Astronom Olin Eggen hatte sie aus unerfindlichen Gründen vor 30 Jahren aus der Bibliothek der Königlichen Sternwarte Greenwich entwendet. Man fand sie in seinem Nachlass. Diese Dokumente liefern neue Einsichten, wie die viktorianischen Astronomen die offizielle Geschichte der Neptunentdeckung konstruierten.



Der jüngst in Cornwall entdeckte Brief, den Adams an Airy schreiben wollte, aber nie vollendete. Hätte Adams es getan, wäre vermutlich britischen Astronomen die Entdeckung des Neptuns gelungen.

▷ des Uranus erklären konnte. Ansonsten lieferte der Zettel keine Hintergrundinformationen über die Theorie oder die Berechnungen. Mehr noch: Bevor ein Beobachter ein Teleskop auf die betreffende Stelle richten konnte, hätte er die mittleren Bahnelemente in eine Position am Himmel umrechnen müssen. In der Version des Schreibens, die Airy später veröffentlicht hatte, fehlte ein Satz aus dem Original – wohl um diese Unzulänglichkeit zu verheimlichen.

Später warfen viele Kritiker Airy vor, er habe die Bedeutung dieses wichtigen Zettels nicht erkannt. Doch Airy hatte tatsächlich an Adams zurückgeschrieben:

Ich fühle mich dem Papier sehr verpflichtet, das Sie mir vor ein paar Tagen dagelassen haben, und das die Störungen (Fehler in Länge) in der Uranusposition durch einen Planeten mit gewissen angenommenen Elementen erklärt. ... Ich würde mich freuen zu erfahren, ob diese angenommene Störung (auch) den Radiusvektor des Uranus erklärt.

Mit dem Radiusvektor spielte Airy auf einen Umstand an, den er selbst aus seinen intensiven Beobachtungen in den 1830er Jahren abgeleitet hatte: Zusätzlich zur Positionsverschiebung in Länge stand Uranus etwas weiter von der Sonne entfernt, als er eigentlich sollte. Hätte Adams auf diese Anfrage geantwortet, so hätte Airy womöglich eine Suche eingeleitet,

und die Briten hätten die Neptunentdeckung für sich allein reklamieren können. Aber warum antwortete Adams nicht?

Er gab nie eine direkte Antwort auf diese Frage. In hohem Alter sagte Adams, er habe Airys Frage für »trivial« gehalten und es darum nicht für nötig erachtet, sie zu beantworten. Aber in einer Veröffentlichung seiner Berechnungen nach der Neptunentdeckung gab er zu, dass der Radiusvektor »manchmal beträchtlich« war. Der Cambridger Geologe Adam Sedgwick (1785–1873) fragte Adams im Dezember 1846, ob sein Schweigen damit zusammengehangen hätte, dass er Airy nicht getroffen hatte. Adams verneinte dies. Stattdessen führte er sein zauderndes Wesen und die Abneigung gegen das Schreiben an.

Wir wissen heute durch ein Schriftstück, das wir erst 2004 in einer separaten Sammlung von Adams' Familienunterlagen in Cornwall gefunden haben, dass Adams tatsächlich einen Brief an Airy begonnen hatte – allerdings ohne ihn je fertigzustellen und abzusenden. In dem Entwurf vom 13. November 1845 kündigte Adams eine genaue Beschreibung seiner Methode an und gab einen kurzen historischen Überblick über seine frühen Arbeiten – dann endet das Schreiben nach zwei Seiten abrupt. Zwei weitere Ausarbeitungen von Adams aus jener Zeit enthalten die Formel für den fraglichen Radiusvektor, aber sie lassen nicht erkennen, ob er ihn auch wirklich berechnet hatte. Es scheint, als habe Adams die Wichtigkeit von Airys Frage erkannt, sie aber – aus welchen Gründen auch immer – nie beantwortet.

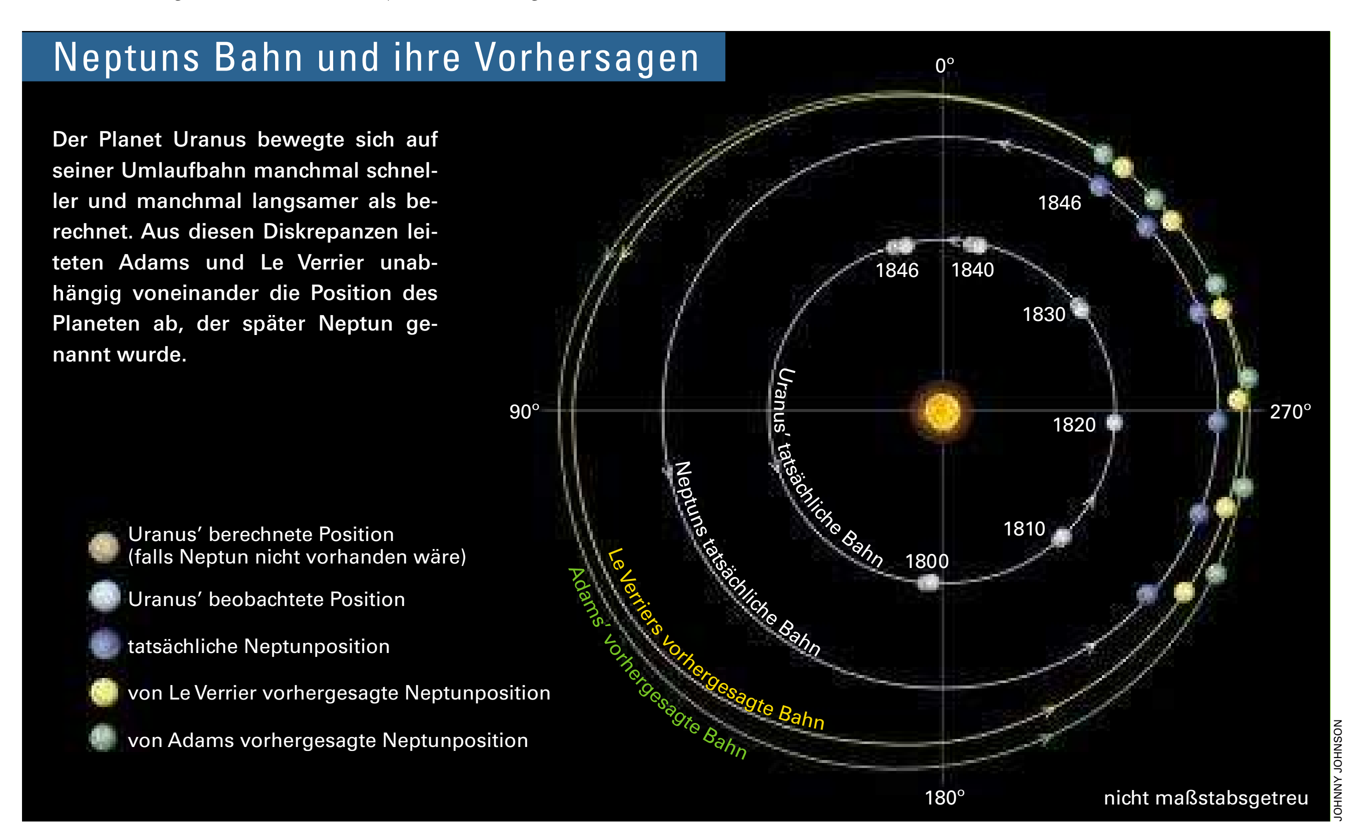
Nach der Entdeckung des Neptuns schrieb Adams an Airy, er hätte sich überlegt, mit den kleinen Teleskopen der College-Sternwarte selbst nach dem hypothetischen Planeten zu suchen. Aber stillschweigend erkannte er an, dass er Challis und Airy nicht von einer Suche des Planeten zu überzeugen vermochte, weil er ihnen seine Methode nicht erläutert hatte: »Ich konnte doch nicht erwarten, dass beobachtende Astronomen, die bereits mit wichtigen Aufgaben eingedeckt waren, von den Ergebnissen genauso überzeugt sein würden wie ich selbst.«

Verpasste Chance

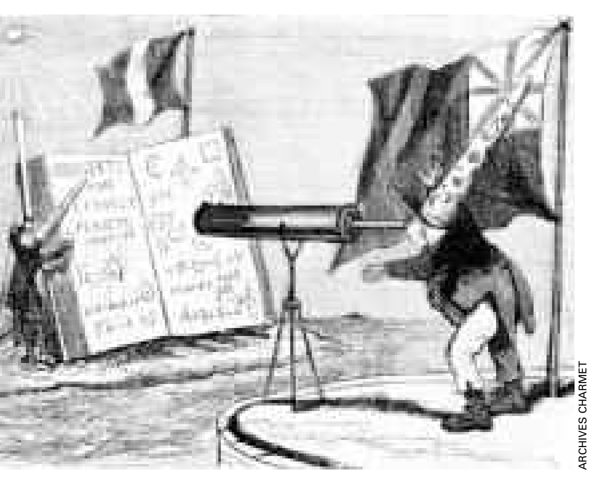
In der ersten Hälfte des Jahres 1846 wandte sich Adams Problemen zu, die in seinen Augen dringlicher waren: die Bahnberechnung für die Bruchstücke eines gerade entzweigebrochenen Kometen. Außerdem ging es ihm wie jedem heutigen Akademiker: Die Lehre beanspruchte einen Großteil seiner Zeit, wodurch seine Forschungen zu kurz kamen. Bislang deutet kein Schriftstück darauf hin, dass sich Adams vor Ende Juni 1846 erneut mit Uranus beschäftigte. Dies änderte sich erst, als Le Verriers Veröffentlichung in England ankam.

Daraufhin – und nur daraufhin – schlug Airy seinem Kollegen Challis eine Suche vor. Adams wirkte dabei mit, indem er die Position des hypothetischen Planeten für Spätsommer und Frühherbst berechnete. Doch dabei stützte er sich nicht – wie zuerst Rawlins bemerkte – auf seine eigene Theorie, sondern auf Le Verriers Kreisbahn.

Challis begann seine Suche am 29. Juli. Sein Beobachtungsbuch belegt, dass er sorgfältig und genau arbeitete. Von der Sternkarte der Berliner Akademie (jener Karte, die Galle und d'Arrest Ende September jenes Jahres verwendeten) wusste Challis nichts, deshalb musste er während der Suche seine eigene Sternkarte erstellen. Dazu zeichnete er die Position eines jeden Himmelskörpers auf, den er zweimal beobachtet hatte. Sollte sich ein Objekt bewegt haben, wäre es ein Kandidat für den Planeten. Die Arbeit kostete wertvolle Zeit und wurde nicht einfacher durch den großen Bereich, den Airy untersucht haben wollte. Bis September erfasste Challis 3000 Sterne. Zweimal – am 4. und 12. August – erfasste er dabei ein Objekt, das nachträglich als Neptun identifiziert worden ist. Weil er die Posi- ▷



Der Planet Uranus bewegte sich auf seiner Umlaufbahn manchmal schneller und manchmal langsamer als berechnet. Aus diesen Diskrepanzen leiteten Adams und Le Verrier unabhängig voneinander die Position des Planeten ab, der später Neptun genannt wurde.



ARCHIVES CHARMET

Diese Karikatur thematisiert die frühen Zweifel der Franzosen an der Legitimität der britischen Mitentdeckerschaft des Neptuns und erschien am 7. November 1846 in »L'Illustration«. Der Bildtext lautet: »Mr. Adams entdeckt den neuen Planeten in den Aufzeichnungen von Monsieur Le Verrier.« Angesichts der damals bekannten Dokumente schwanden die Zweifel, sind inzwischen aber weit gehend bestätigt worden.

tionen nicht sofort vergleichen konnte, verpasste Challis seine Chance, den Planeten zu entdecken.

Inzwischen korrigierte Adams seine eigenen Berechnungen und fasste sie am 2. September in einem Brief an Airy zusammen. Zu diesem Zeitpunkt war ihm schon lange bewusst, dass die Verwendung der Titius-Bode-Regel willkürlich und die von ihm angenommene stark exzentrische Bahn des hypothetischen Planeten nicht plausibel war. Während seines Sommerurlaubs hatte er eine grundlegend neue Berechnung durchgeführt und erkannt, dass eine kleinere, kreisförmige Bahn gut zu den Beobachtungen passen würde. Doch dann tüftelte er weiter und zog eine noch kleinere Umlaufbahn in Betracht. Dies würde, so seine Überlegung, womöglich zu einer Länge führen, die sich stark von seinen ursprünglichen Vorhersagen unterschied.

Wie wir heute wissen, brachten die neuen Annahmen von Adams den Planeten näher an eine Resonanz mit Uranus. Dadurch würden sich die Gravitationseinflüsse beider Himmelskörper aufschaukeln und Adams' mathematischen Ansatz von vornherein zunichte machen. Zu jenem Zeitpunkt spielte dies aber keine Rolle mehr, denn die neuen Berechnungen kamen zu spät, um die Suche nach dem Planeten noch zu beeinflussen.

Einen Aspekt in Adams' Berechnungen erwähnen Historiker selten: Er beschrieb seinen Planeten immer als eine Abstraktion. Es handelte sich einfach um einen Satz Bahnelemente, einen Trick, um Zahlenreihen stimmig zu machen. Le Verrier hingegen veröffentlichte eine bestimmte Position für seinen hypothetischen Planeten und beschrieb ein reales physikalisches Objekt, das die Sonne am Rand des Planetensystems in eisiger Dunkelheit umkreiste. In einer Veröffentlichung im August schrieb er mutig, der Planet sollte im Teleskop anhand seiner Scheibe zu erkennen sein. Das regte Challis dazu an, dem Aussehen der zu katalogisierenden Objekte mehr Aufmerksamkeit zu schenken. Am 29. September notierte er, dass eines »eine Scheibe zu haben scheint«. Allerdings war derselbe Himmelskörper bereits sechs Tage zuvor an der Berliner Sternwarte gesehen und als Planet erkannt worden. Es handelte sich nicht mehr bloß um eine hypothetische Welt. »Gott im Himmel, es ist ein großer Bursche!«, schrie Galle damals vor Freude auf.

Eine Frage der Ehre

Aus unserer Untersuchung der Originaldokumente schließen wir, dass Adams' britische Zeitgenossen ihm mehr Ehre zuteil werden ließen, als er verdiente – auch wenn er einige bemerkenswerte Berechnungen durchgeführt hatte. Ganz gewiss kommt ihm die Ehre zu, zusammen mit Le Verrier einer der Wegbereiter in der Anwendung der Störungstheorie auf die Planetenbewegung zu sein. Möglicherweise hatte Adams großes Vertrauen in die Genauigkeit und Zuverlässigkeit seiner Ergebnisse. Allerdings ist sehr wohl bekannt, dass Menschen nach dem Eintreten eines Ereignisses viel stärker davon überzeugt sind, den Ausgang richtig vorhergesagt zu haben.

Jedenfalls versagte Adams völlig dabei, die Ergebnisse seinen Kollegen in aller Welt überzeugend darzustellen. Eine Entdeckung besteht nicht einfach darin, eine vorläufige Untersuchung eines interessanten Problems vorzunehmen und einige Berechnungen durchzuführen; man muss auch erkennen, dass man eine Entdeckung gemacht hat, und dies der Wissenschaftlergemeinde effektiv mitteilen. Eine Entdeckung hat also eine öffentliche und eine private Seite – und Adams hat diese Aufgabe nur zur Hälfte gelöst. Ironischerweise erwiesen sich Le Verriers besondere persönliche Fähigkeiten, die ihn als Entdecker begünstigten – seine Unverfrorenheit und Schärfe, im Gegensatz zu Adams' Scheu und Naivität – als nachteilig bei dem nachfolgenden Hickhack. Die britische Wissenschaftlergemeinde stellte sich geschlossen hinter Adams, während Le Verrier bei seinen Kollegen nicht sonderlich beliebt war.

Die Geschichte unterstreicht auch die Rolle des Glücks bei einer Entdeckung. Streng genommen sagten weder Adams noch Le Verrier die Neptunposition richtig voraus. Beide überschätzten die Entfernung des Planeten zur Sonne und erhielten nur in etwa die richtige Länge, weil die Bahnen beider Himmelskörper zeitlich so günstig zusammentrafen. So etwas passiert häufig in den Naturwissenschaften (ein Jahrhundert später half der gleiche Zufall bei der Entdeckung des Planeten Pluto).

Nachdem sich inzwischen die internationalen Rivalitäten der 1840er Jahre gelegt haben und die Originaldokumente den Historikern wieder zur Verfügung stehen, können wir versichern, dass Adams nicht die gleiche Ehre wie Le Verrier für die Neptunentdeckung zusteht. Denn diese Ehre gebührt demjenigen, der die Planetenposition sowohl richtig vorausgesagt hat als auch die Astronomen davon überzeugen konnte, nach dem Objekt zu suchen. Diese Leistung vollbrachte nur Le Verrier. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE

William Sheehan, **Nicholas Kollerstrom** und **Craig B. Waff** sind Wissenschaftshistoriker. Sheehan ist als Psychiater Experte für Autismus und das Asperger-Syndrom. Kollerstrom ist Postdoktorand am University College London. Waff ist Historiker des Air Force Research Laboratory in Dayton (Ohio).

Die Akte Neptun. Die abenteuerliche Geschichte der Entdeckung des 8. Planeten. Von Tom Standage. Campus, Frankfurt 2001

British Neptune-Disaster file recovered. Von Dennis Rawlins in: DIO, Bd. 9, Heft 1, S. 3, Juni 1999

The Planet Neptune. A historical survey before Voyager. Von Patrick Moore. Praxis, 1996

The Cambridge network in action. The discovery of Neptune. Von Robert W. Smith in: Isis, Bd. 80, Heft 303, S. 395, September 1989

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Der freie Wille auf dem Prüfstand

Schon bevor wir uns der Absicht bewusst sind, eine Bewegung auszuführen, werden motorische Zentren im Gehirn aktiv. Wieso erleben wir die Bewegung dennoch als selbstbestimmten Willensakt?

Von Sukhvinder S. Obhi und Patrick Haggard

Ein Samstagnachmittag im Winter. Jemand hat alle Hausarbeiten erledigt und macht es sich mit einem Roman und einer Tasse Tee vor dem Kamin gemütlich. Da das Tageslicht allmählich schwindet, streckt der Mensch die Hand nach dem Lichtschalter aus. Nun ist es hell genug, und er beginnt zu lesen.

Uns allen sind solche Szenen vertraut. Tagtäglich vollführen wir Handlungen, die unsere äußere Umgebung in einen bestimmten Zustand versetzen – beispielsweise ein dunkles Zimmer mit Licht versorgen. Obwohl wir solchen Handlungen kaum Aufmerksamkeit schenken, sind wir überzeugt, dass wir durch Absichten und Entscheidungen die Bewegungen unserer Arme und Hände willentlich steuern. Das hört sich ganz plausibel an, ist aber gar nicht leicht zu beweisen.

Selbst eine so simple Handlung wie Lichteinschalten setzt sich aus vielen Einzelschritten zusammen. In unserem Beispiel erkennt der Akteur, dass es im Zimmer zu dunkel zum Lesen ist, und setzt sich das Ziel, den Raum zu erhellen. Um dieses Ziel zu erreichen, beschließt er, eine Lampe einzuschalten. Genauer gesagt: Dieser Leser erzeugt die Intention, zum Schalter zu greifen, und führt dann die entsprechende Bewegung aus. Der gesamte Handlungsablauf umfasst demnach mehrere Ereignisse – Formulieren eines Ziels, Formulieren einer Intention, Auslösen der Bewegung und tatsächliches Einschalten der Lampe.

Erzeugt die Reihenfolge, in der wir solche Ereignisse erleben, das subjektive Empfinden, gleichsam Herr im eigenen Haus zu sein? Wir sind uns offenbar einer bestimmten zeitlichen Ereignisfolge bewusst, deren Richtung den Eindruck eines Kausalzusammenhangs hervorruft: aus dem Innern unseres Geistes, in dem wir eine Intention formulieren, hinaus in den äußeren Raum, wo wir einen Lichtschalter betätigen, um den Raum zu erhellen. Dennoch könnte unser Gefühl von Verfügungsgewalt auf mehr beruhen als auf dem bloßem Hintereinander der Ereignisse. Um die neurale Grundlage menschlicher Handlungswahrnehmung zu ergründen, muss die Abfolge der subjektiven Erlebnisse wissenschaftlich untersucht werden: Folgen sie einem Muster neuraler Ereignisse mit demselben charakteristischen Ablauf?

Dabei geht es um weit mehr als um das Drücken eines Schalters. Das Gefühl der Kontrolle über unsere Handlungen spielt offenbar eine Rolle für unser bewusstes Selbstgefühl: Ich bin, weil ich meine Handlungen steuere. Aber wie entwickeln wir aus gewöhnlichen Alltagshandlungen ein Selbstgefühl als deren Verursacher? Um dies zu beantworten, muss man zum einen die subjektiven Empfindungen von Menschen während solcher Handlungen untersuchen, zum anderen die entsprechenden Aktivitäten im Nervensystem und schließlich die subjektiven Erlebnisse von Personen, denen das übliche Gefühl von Kontrolle fehlt. Wie wir zeigen werden, werfen die Erkenntnisse der kognitiven Neurowissenschaften ein überraschendes Licht auf die Hirnvorgänge, die unserem Gefühl bewussten Wollens zu Grunde liegen. Offenbar steuern wir unsere Handlungen nicht mit völlig freiem Willen.

Wer ist Herr im Haus?

Im Jahre 1983 veröffentlichten Benjamin Libet und seine Mitarbeiter an der Universität von Kalifornien in San Francisco einen äußerst einflussreichen Artikel über die Quelle der Handlungskontrolle. Versuchspersonen beobachteten einen Uhrzeiger, der für einen Umlauf 2,56 Sekunden brauchte. Mit Blick auf die Uhr krümmte eine Testperson willkürlich zu einem beliebigen Zeitpunkt ein Handgelenk und gab an, bei welchem Zeigerstand ihr der Bewegungsentschluss erstmals bewusst geworden war. Libet nannte diese subjektive Einschätzung *W* für »Wille«. In anderen Durchgängen beurteilten die Versuchspersonen, wann ihre Bewegung tatsächlich be-


SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

gonnen hatte. Dieses Urteil nannte Libet *M* nach englisch »movement«; hier soll es im Folgenden *B* für »Bewegung« heißen. Am Zeitpunkt von *W* und *B* konnten die Forscher ablesen, wann ein Proband die subjektive Bewegungsentscheidung traf und wann er sie auszuführen meinte.

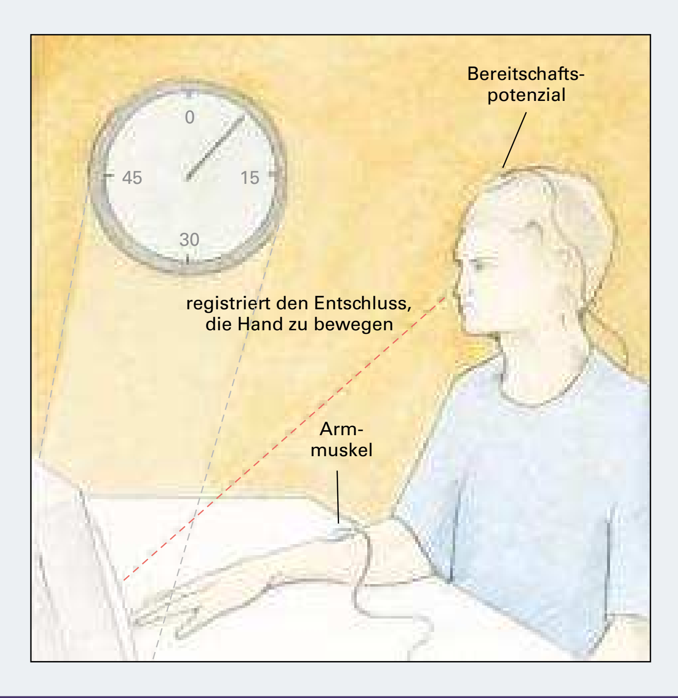
Außerdem bestimmte Libet zwei objektive Parameter: die elektrische Aktivität über den motorischen Hirnarealen und die elektrische Aktivität in den an der Handbewegung beteiligten Muskeln. Über den motorischen Arealen registrierte Libet ein wohlbekanntes psychophysisches Korrelat der Bewegungsvorbereitung, das so genannte Bereitschaftspotenzial (BP), welches die deutschen Neurologen Hans Kornhuber und Lüder Deecke 1965 entdeckt hatten. Das BP lässt sich mit Hilfe eines Elektroenzephalografen ableiten; das Gerät verstärkt die Signale von Elektroden auf dem Bereich der Schädeldecke, der über den motorischen Regionen des Stirnlappens liegt, und gibt sie als Diagramm aus. Das BP erscheint als ein allmählicher Anstieg der elektrischen Aktivität, welcher der Willkürbewegung um etwa eine Sekunde vorausgeht. Da Libet auch die elektrische Aktivität der beteiligten Armmuskeln aufzeichnete, konnte er den Beginn der Muskelaktivität im Verhältnis zum BP genau ermitteln.

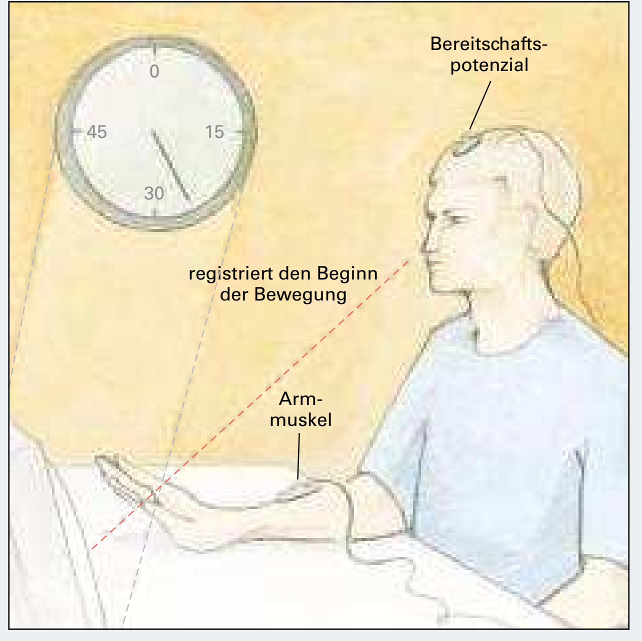
Libet untersuchte nun die zeitliche Abfolge von bewusstem Erlebnis und neuraler Aktivität, indem er die subjektiven *W*- und *B*-Urteile mit dem objektiven BP und der Muskelaktivität verglich. Wie erwartet kam *W* vor *B*. Anders gesagt, die Versuchsteilnehmer nahmen die Bewegungsabsicht zeitlich früher wahr als die reale Bewegung. Dies spricht zunächst für einen analogen Zusammenhang zwischen der Abfolge der subjektiven Erfahrungen und der Abfolge der zu Grunde liegenden Hirnvorgänge. Doch Libet fand eine überraschende zeitliche Beziehung zwischen subjektiver Erfahrung und neuralen Vorgängen. Die tatsächliche neurale Bewegungsvorbereitung – das Bereitschaftspotenzial BP – setzte 300 bis 500 Millisekunden (tausendstel Sekunden) früher ein als *W*, die bewusste Wahrnehmung der Bewegungsintention. Einfacher gesagt: Das ▷

Wenn es dunkel wird, machen wir Licht. Dieser simple Vorgang entpuppt sich bei genauer Analyse als komplexe Abfolge von Zielen, Intentionen und Aktionen. Überraschenderweise stimmt deren subjektiv erlebtes Nacheinander nicht mit den Hirnvorgängen überein.

Der klassische Versuchsaufbau von Benjamin Libet

Während die Versuchsperson auf dem Bildschirm einen Uhrzeiger beobachtet, hebt sie willkürlich den Handrücken. In einigen Experimenten (linkes Bild) merkt sie sich die Stellung des Zeigers zu dem Zeitpunkt, in dem sie beschließt, die Hand zu bewegen. Dieser Zeitpunkt heißt *W*-Urteil (für »Wille«). In anderen Durchgängen (rechtes Bild) registriert der Proband, wann nach seinem Empfinden die reale Bewegung einsetzt, und fällt damit ein *B*-Urteil (für »Bewegung«). In beiden Fällen wird das Bereitschaftspotenzial vom motorischen Cortex und vom Unterarmmuskel abgeleitet.





EMMA SKURNICK

▷ Gehirn bereitete eine Bewegung vor, bevor der Proband bewusst beschlossen hatte, sie auszuführen! Demnach scheint die bewusste Empfindung einer Intention eher die Wirkung einer vorbereitenden motorischen Gehirnaktivität zu sein als deren Ursache. Wie Libet selbst anmerkte, stand dieser Befund in diametralem Gegensatz zum klassischen Begriff der Willensfreiheit.

Nach neueren Erkenntnissen hängt das Bewusstwerden einer Intention eher mit einer speziellen Komponente des BP zusammen, dem lateralisierten Bereitschaftspotenzial (LBP). Während das BP bei jeder motorischen Aktivität in beiden Hirnhälften auftritt, entsteht das LBP nur in einer Hemisphäre – und zwar in derjenigen, die der Seite der intendierten Handlung entgegengesetzt ist. Da die linke Hirnhälfte die Motorik der rechten Körperhälfte steuert und umgekehrt, ist das LBP wegen seiner Asymmetrie ein engeres Korrelat der Bewegungsvorbereitung als das BP. Zudem entwickelt sich das LBP rund 500 Millisekunden vor der realen Bewegung – und somit erst nach dem allgemeinen BP.

1999 führte einer von uns (Haggard) gemeinsam mit Martin Eimer am Max-Planck-Institut für Psychologische Forschung in München ein Experiment vom Libet-Typ durch, bei dem zwischen BP und LBP differenziert wurde. Wie sich zeigte, hängt das bewusste Erleben einer Bewegungsintention stärker vom LBP ab als vom BP. Dies spricht dafür, dass das Bewusstwerden einer Absicht mit der Auswahl einer konkreten Bewegung verbunden ist – und nicht mit dem Vorhaben, einfach irgendeine Bewegung auszuführen. In unserem Beispiel könnte das subjektive Erleben, das dem Einschalten des Lichts vorausgeht, mit der Entscheidung zusammenhängen, welche Hand nach dem Schalter ausgestreckt werden soll.

Nicht freier Wille, sondern »freies Nichtwollen«

Wie auch immer ein Wissenschaftler diese Daten drehen und wenden mag – das Gehirn wird offenbar aktiv, bevor der Mensch die Intention einer Bewegung bewusst erlebt. Heißt das: Bewusstseinsvorgänge spielen bei der Steuerung von Handlungen überhaupt keine Rolle? Zwar wecken Libets Resultate gewisse Zweifel, ob bewusste Prozesse Aktionen verursachen, doch dies schließt nicht aus, dass Bewusstseinsvorgänge Handlungen beeinflussen, indem sie bereits begonnene Hirnvorgänge modifizieren. Immerhin tritt die Bewegungsintention einige hundert Millisekunden vor der tatsächlichen Ausführung ins Bewusstsein; also vermag der Mensch das Ausführen bestimmter Handlungen noch zu verhindern. Anscheinend hat Libet den freien Willen durch das freie Nichtwollen ersetzt.

In gewissem Sinn zeigen Libets Befunde, dass das Gehirn sozusagen vor dem Startschuss losläuft, denn die bewegungsbezogene neurale Aktivität setzt ein, bevor die Person die Bewegungsintention erlebt. Libet entdeckte noch einen weiteren Fehlstart: Das subjektive Urteil der Probanden darüber, wann die Bewegung einsetzte, erfolgte im Mittel 86 Millisekunden vor dem Beginn der elektrischen Aktivität in den entsprechenden Muskeln. Demnach muss unser subjektives Erleben des Bewegungsbe-

ginns ebenfalls von einem prämotorischen Vorgang stammen – von etwas, das stattfindet, bevor die Muskeln sich zusammenziehen. Zwar bezweifelten einige Forscher die Gültigkeit der Zeitangaben von Libets Probanden, doch seine Ergebnisse machten bleibenden Eindruck und wurden als ernster Einwand gegen eine vom Geist zum Körper führende Kausalkette interpretiert. Mittlerweile bestätigen zahlreiche weitere Studien das Phänomen der antizipatorischen Handlungsbewusstheit.

Anscheinend verläuft der Kausalzusammenhang zwischen unseren Intentionen und unseren Aktionen nicht in der intuitiv erlebten Richtung. Doch wenn wir uns unserer Handlungen nicht zur richtigen Zeit bewusst werden, was nehmen wir stattdessen wahr? Diese Frage droht uns mitten in das Minenfeld zu führen, das die philosophische Debatte um den freien Willen umgibt. Darum möchten wir uns lieber einer wissenschaftlich zugänglicheren Frage widmen: Wie entsteht unser bewusstes Empfinden eines freien Willens aus der Hirntätigkeit?

Vorweggenommene und wahrgenommene Bewegung

Unsere Urteile über den Zeitablauf unserer Bewegungen sind offenbar unpräzise und voreilig. Am Erleben eines Handlungsbeginns können mehrere prämotorische Prozesse beteiligt sein – unter anderem Willensakt, Intention und Vorbereitung. Wenn wir im Alltag Bewegungen ausführen, absolviert unser Gehirn verschiedene Verarbeitungsschritte. Nachdem ein Ziel feststeht, wählt unser Nervensystem ein geeignetes Bewegungsprogramm aus. Die Aufgabe, Steuersignale für einen Bewegungsablauf zu erzeugen, erfordert intensive Berechnungen; das lässt sich an dem relativ beschränkten Bewegungsrepertoire selbst modernster Roboter studieren. Da unsere bewusste Bewegungsabsicht mit dem Einsetzen des LBP zusammenhängt, ist unser Bewegungsbewusstsein offenbar mit der Planung einer bestimmten Aktion verbunden.

Das für Bewegungsplanung zuständige Hirnareal ist der prämotorische Cortex. Er sendet Signale an den primären motorischen Cortex – auch MI genannt –, welcher seinerseits Motoneuronen im Rückenmark aktiviert. Diese wiederum innervieren bestimmte Muskeln, welche schließlich die Bewegung ausführen.

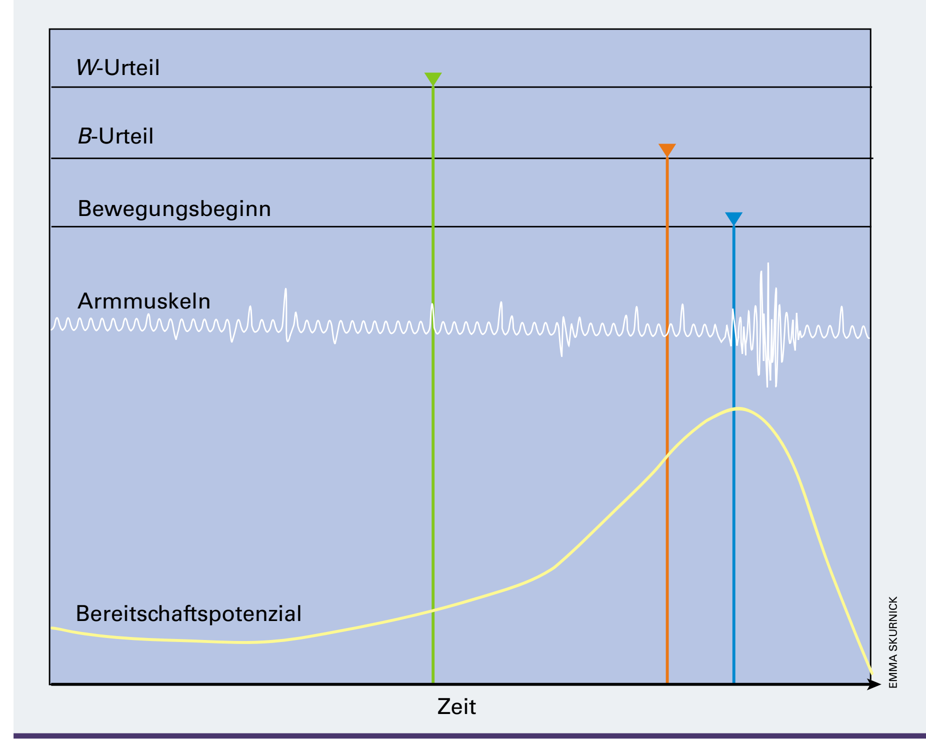
Um dem neuralen Substrat unseres Handlungsbewusstseins auf die Spur zu kommen, führte einer von uns (Haggard) gemeinsam mit Elena Magno, die jetzt am Trinity College in Dublin forscht, modifizierte Libet-Experimente durch. Wenn die Versuchspersonen ein Signal hörten, drückten sie eine Taste, und das Gerät maß ihre Reaktionszeit. Zusätzlich schätzten die Probanden ihre Reaktionszeit ein, indem sie die Stellung eines Uhrzeigers zum vermeintlichen Zeitpunkt des Tastendrückens angaben.

Der Clou dieser Experimente war aber der Einsatz der transkraniellen Magnetstimulation (TMS). Dabei wirkt ein starkes, rasch variierendes Magnetfeld durch die Schädeldecke auf eine bestimmte Großhirnregion ein und stört dort die neurale Verarbeitung. Haggard und Magno stimulierten mittels TMS entweder den primären motorischen Cortex MI oder das unmittelbar davor liegende supplementär-motorische Areal (SMA), das Bewegungen plant. Die Störung durch TMS erfolgte etwa 75 Millisekunden vor der mutmaßlichen Reaktion des Probanden. Die TMS sollte den tatsächlichen oder subjektiven Zeitpunkt der Bewegung verschieben und dadurch enthüllen, welche Region – MI oder SMA – vorwiegend am Bewusstwerden der Bewegung oder an der Bewegung selbst beteiligt ist.

Das Experiment war erfolgreich. TMS über dem Areal MI verzögerte die tatsächliche Bewegung um durchschnittlich 201 Millisekunden, die subjektiv geschätzte um 74 Millisekunden. Hingegen verzögerte TMS über dem SMA die ▷

Antizipiert das Gehirn den Entschluss?

Wie die Experimente zeigen, beginnt sich das Bereitschaftspotenzial schon vor der Handbewegung aufzubauen. Etwa zu dieser Zeit glaubt die Versuchsperson, die Entscheidung für eine Bewegung zu fällen (*W*, grün). Etwa 100 Millisekunden vor der realen Aktion glaubt die Versuchsperson, die Bewegung habe begonnen (*B*, orangerot). Schließlich fängt das Handgelenk an, sich zu bewegen (blau), wie das Feuern der Neuronen im Unterarm belegt. Zwar findet die bewusste Bewegungsintention *(W)* vor dem bewussten Bewegungserlebnis *(B)* statt, aber die tatsächliche neurale Bewegungsvorbereitung – das Bereitschaftspotenzial – geht beidem voraus. Auch setzte das subjektive Gefühl des Bewegungsbeginns *(B)* früher ein, als die Muskeln tätig wurden. Demnach verläuft die Kausalkette von Intention zu Aktion nicht in der intuitiv empfundenen Richtung.



▷ Bewegung im Schnitt um 113 und deren bewusste Wahrnehmung um 54 Millisekunden. Unter der zweiten Bedingung war dem Probanden die Veränderung der Reaktionszeit stärker bewusst, obwohl sie tatsächlich geringer ausfiel. Dies spricht dafür, dass das Bewusstwerden einer Bewegung zumindest teilweise zwischen SMA und MI stattfindet.

Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung war Itzhak Fried, der heute an der Universität von Kalifornien in Los Angeles tätig ist, schon 1991 gelangt. Er wollte bei Patienten mit schwerer Epilepsie klinisch abklären, welche Hirnregionen besonders stark an den Anfällen beteiligt waren. Da das Gehirn schmerzunempfindlich ist, führte Frieds Team Elektroden direkt in verschiedene Hirnareale ein und reizte diese elektrisch. Wenn das SMA stimuliert wurde, fühlten manche Patienten den Drang, eine Bewegung auszuführen, oder antizipierten deren Beginn. Wurde der elektrische Reiz intensiviert, führten die Patienten mit dem Körperglied, das sie zuvor hatten bewegen wollen, echte Bewegungen aus.

Alles in allem passen diese Befunde sehr gut zu aktuellen neurowissenschaftlichen Theorien der Sensomotorik. Demnach repräsentieren interne Modelle im Gehirn die gegenwärtigen, gewünschten und erwarteten Zustände der Gliedmaßen und der Außenwelt. Bevor eine bestimmte Bewegung ausgeführt wird, wandert diese Information in ein so genanntes Vorwärtsmodell, das die künftige Bewegung und das dabei erzeugte sensorische Feedback simuliert. Das vorweggenommene sensorische Feedback wird mit einer gespeicherten Repräsentation der gewünschten sensorischen Rückmeldung verglichen – das heißt mit einem Modell, welches frühere Erfahrungen mit derselben Handlung zusammenfasst und angibt, wie sich eine Bewegung anfühlen sollte. So werden Abweichungen korrigiert, noch bevor die eigentliche Bewegung beginnt.

Zeitabstand und Willenserlebnis

Solche internen Vorwärtsmodelle erklären die blitzschnellen Korrekturen bei motorisch Geübten – aber auch die weniger glanzvollen Leistungen Ungeübter, die offenbar nicht über optimierte interne Modelle verfügen. Man bedenke, dass diese Vorausverarbeitung vor einer realen Bewegung stattfindet. Wenn wir uns bewegen, wird uns möglicherweise gar nicht die tatsächliche Bewegung bewusst, sondern die vorweggenommene.

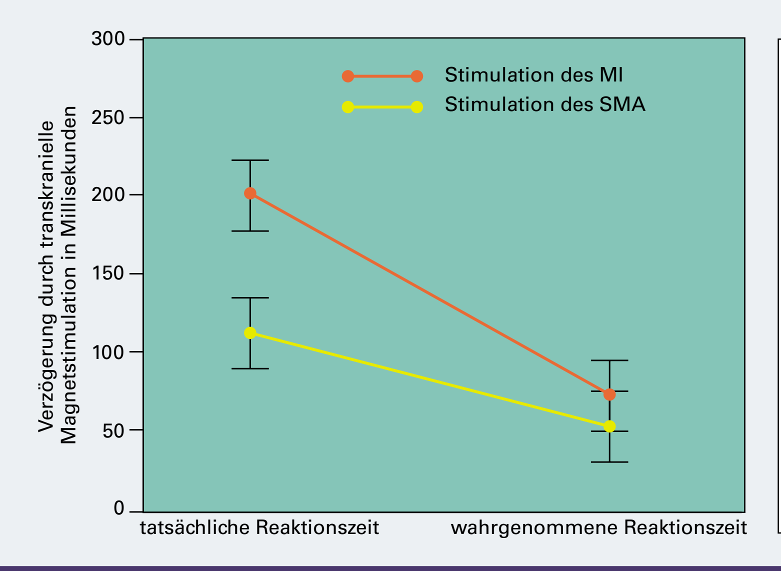
Obwohl wir versuchen, das Minenfeld der Willensfreiheit zu meiden, kommen wir nicht ganz daran vorbei. Manche Theorien behaupten, es müsse eine bestimmte zeitliche Abfolge in der Wahrnehmung von Ereignissen geben, damit ein freier Wille erlebt wird. Einer von uns (Haggard) und seine Mitarbeiter nahmen diesen Aspekt genauer unter die Lupe: Wie beeinflussen Zeitabstände zwischen Schlüsselereignissen beim Produzieren und Steuern der Bewegung das Gefühl, die Kontrolle auszuüben? Wir ermittelten den objektiven und subjektiven Zeitverlauf willkürlicher und unfreiwilliger Bewegungen sowie deren sensorische Konsequenzen.

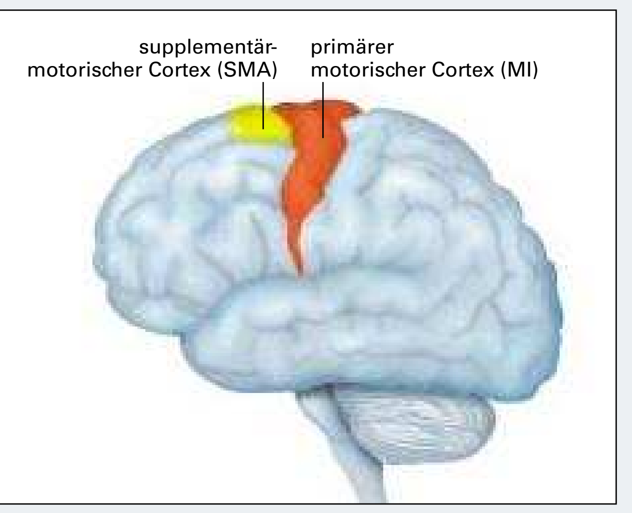
Zunächst lieferte ein Ansatz vom Libet-Typ Basisdaten über die wahrgenommenen Zeitpunkte eines freiwilligen oder erzwungenen Tastendrucks mit dem linken Zeigefinger. Um die unfreiwillige Bewegung zu erzeugen, drückte ein Motor den Finger auf die Taste. Ein durch TMS erzeugtes Zucken des rechten Zeigefingers lieferte Basisdaten über den wahrgenommenen Zeitpunkt einer sensorischen Konsequenz.

In den eigentlichen Experimenten wurden stets zwei solche Basisereignisse gekoppelt – eine Handlung und eine Folge davon. Erstere hing mit dem linken Finger zusammen, Letztere war das Zucken des rechten Fingers, das durch

Wo Bewegungen geplant und ausgelöst werden

Im Gehirn (rechts) plant der supplementär-motorische Cortex (SMA, blau) Bewegungen, und der primäre motorische Cortex (MI, rot) löst sie aus. Sobald ein akustisches Signal ertönt, drücken die Probanden eine Taste und registrieren den Zeitpunkt, zu dem sie den Beginn der Bewegung wahrnehmen. Außerdem wird die tatsächliche Reaktionszeit gemessen, während SMA oder MI mittels transkranieller Magnetstimulation (TMS) gestört werden. Aus den Resultaten (links) schließen die Forscher, dass das Bewusstwerden der Bewegung zwischen SMA und MI stattfindet.

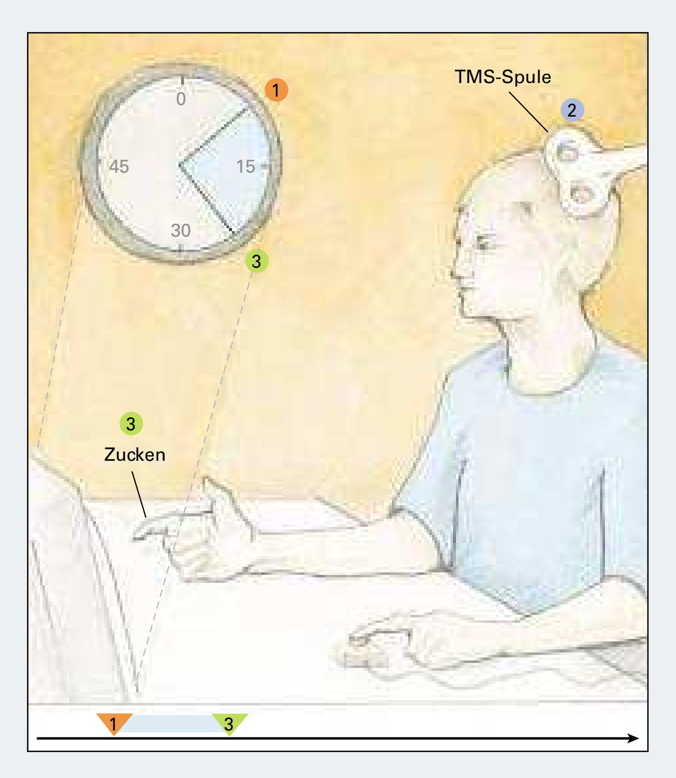


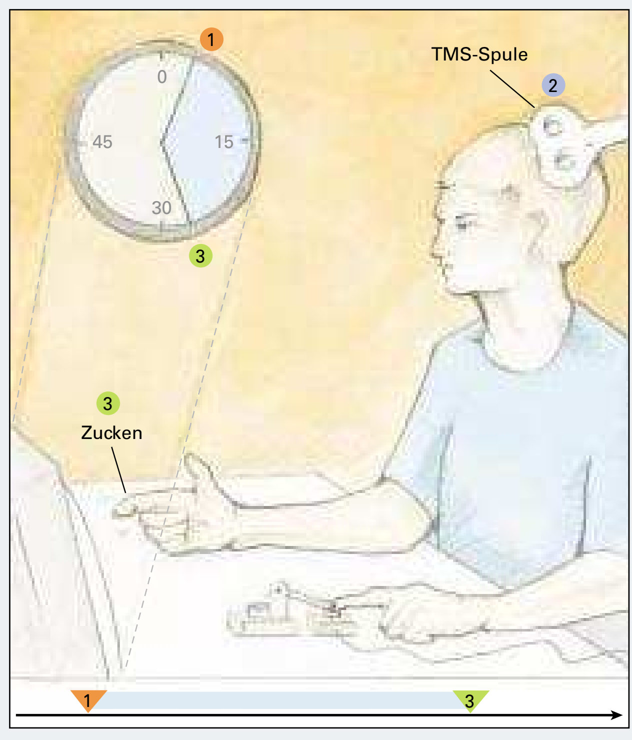


LINKS: EMMA SKURNICK; RECHTS: SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Willkürliche und erzwungene Handlungen

Unser Eindruck, eine Bewegung geschehe aus freien Stücken, scheint mit den – wirklichen oder vermeintlichen – Ergebnissen der Bewegung verknüpft zu sein. Die Versuchsperson registriert auf einer Uhr, wann sie mit dem linken Zeigefinger eine Taste drückte (linkes Bild, 1). Die Taste löste über TMS (2) ein Zucken des rechten Zeigefingers aus, und die Testperson vermerkte auch diesen Zeitpunkt (3). In anderen Experimenten (rechtes Bild) drückte ein Motor den linken Zeigefinger nieder. Wiederum registrierte die Person den wahrgenommenen Zeitpunkt des – diesmal unfreiwilligen – Tastendrucks und des Zuckens im anderen Finger. Bei der freiwilligen Handlung erschien der Abstand zwischen Tastendruck und Fingerzucken dem Probanden kürzer als beim erzwungenen Tastendrücken. Diese Resultate sprechen für eine Art Bindungsmechanismus, der intentionale Handlungen zeitlich näher an ihre wahrgenommenen Wirkungen heranzieht.





den Tastendruck ausgelöst wurde. Wenn die Versuchsperson eine freiwillige Handlung ausführte, schien diese später zu geschehen – und der somatische Effekt früher einzusetzen – als unter den Basisbedingungen. Bei unfreiwilligen Bewegungen wurde hingegen die Handlung relativ früher erlebt und die Wirkung später. Das heißt, die beiden wahrgenommenen Ereignisse – Aktion und sensorische Konsequenz – lagen bei Willkürbewegungen scheinbar zeitlich näher zusammen, bei erzwungenen Bewegungen dagegen weiter auseinander.

Diese Ergebnisse deuten auf eine Art Bindungsmechanismus hin, der willentliche Handlungen zeitlich enger an ihre wahrgenommenen Wirkungen annähert. Vielleicht erzeugt der menschliche Geist unsere Erfahrung, selbst zu handeln, indem er eine enge zeitliche Verknüpfung zwischen Intentionen, Aktionen und Konsequenzen herstellt. Demnach ist nicht bloß die wahrgenommene Ereignisabfolge dafür verantwortlich, dass wir uns selbst als treibende Kraft empfinden, sondern vor allem die wahrgenommene Zeitspanne zwischen diesen Ereignissen. Anscheinend müssen sie innerhalb eines bestimmten subjektiven Zeitfensters stattfinden, damit wir sie als verbunden erleben. Somit könnte ein geeignetes Experiment das Gehirn so überlisten, dass es Kausalität wahrnimmt, wo keine ist, oder umgekehrt.

Vermeintliche Handlungsabsicht

Daniel Wegner verwirklichte diese Idee gemeinsam mit Thalia Wheatley, die derzeit an den amerikanischen National Institutes of Health arbeitet. Zwei Versuchspersonen saßen vor einem Bildschirm und sollten gemeinsam einen Cursor über virtuelle Objekte bewegen. Einer der beiden Teilnehmer war in Wahrheit ein Komplize des Versuchsleiters, was die eigentliche Testperson jedoch nicht wusste. Diese hörte über Kopfhörer Worte, die sich auf bestimmte Objekte auf dem Bildschirm bezogen. Beispielsweise ertönte das Wort »Schwan«, während der Cursor zum Bild eines Schwans wanderte. Allerdings steuerte in Wahrheit ausschließlich der Komplize den Cursor.

Wenn nun das relevante Wort ein bis fünf Sekunden vor der Handlung ertönte, gaben die Versuchspersonen an, sie hätten den Cursor gezielt und absichtlich gesteuert. Mit anderen Worten, sie hatten ein Willenserlebnis. Wurde das Wort jedoch 30 Sekunden vor oder eine Sekunde nach der Handlung dargeboten, blieb der – fälschliche – Eindruck einer willentlichen Handlung aus. Die Forscher sahen darin einen klaren Be- ▷

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

In Stanley Kubricks Filmklassiker von 1964 »Dr. Seltsam oder Wie ich lernte, die Bombe zu lieben« muss Peter Sellers seine rechte Hand hindern, ihm an die Gurgel zu gehen. Tatsächlich gibt es das so genannte Fremde-Hand-Syndrom, bei dem sich eine Hand der Steuerung durch den Willen entzieht. Diese Störung entsteht häufig nach einer einseitigen Schädigung des medialen frontalen Cortex. Dort liegen Hirnareale, die Bewegungen planen und ausführen; ihre Schädigung könnte dazu führen, dass eine Hand quasi ihren eigenen Willen bekommt.

weis, dass das menschliche Gehirn das Gefühl von Handlungsvollmacht erst nach Abschluss der Handlung konstruiert. Vermutlich gibt eine geeignete Abfolge von Intentionen, Aktionen und Konsequenzen dem Gehirn im Nachhinein ein Gefühl von Kontrolle.

Andererseits könnte das Gehirn das Kontrollgefühl auch als direktes Resultat der neuralen Ereignisse erzeugen, die einer Bewegung vorausgehen. In der Tat sprechen einige Studien deutlich gegen die reine Rekonstruktion im Nachhinein, denn bereits vor der Bewegung kann ein starker Eindruck von Absicht und Urheberschaft existieren. Insbesondere Frieds Arbeit von 1991 liefert Indizien dafür. Wie bereits erwähnt reizte Fried den supplementär-motorischen Cortex mit schwachen Strompulsen, worauf manche Patienten von dem Wunsch oder Drang berichteten, die Hand oder den ganzen Arm zu bewegen. Bei sukzessive erhöhter Stromstärke wurde die gewünschte Bewegung tatsächlich ausgelöst.

Demnach scheint sich das bewusste Gefühl einer Intention oder eines Drangs als unmittelbares Nebenprodukt der Aktivität in den motorischen Hirnarealen zu entwickeln, welche die Bewegung vorbereiten. In einer Studie am University College London fanden einer von uns (Haggard) und Sam Clark heraus, dass die Probanden Intention und Handlung nur dann als verbunden empfanden, wenn Aktion und Effekt exakt der Intention entsprachen – nicht aber, wenn Intentionen, Handlungen und Wirkungen bloß hintereinander abliefen. Für ein Gefühl der Handlungskontrolle ist offenbar mehr nötig als nur eine bestimmte Aufeinanderfolge der Ereignisse.

Die beschriebenen Laborstudien gehen der allgemeinen Frage nach, warum Menschen glauben, Kontrolle über ihre Handlungen auszuüben. Doch manche Menschen erleben motorische Handlungen als völlig unkontrolliert. Bei drei neuropsychiatrischen Erkrankungen – Fremde-Hand-Syndrom, Nutzungsverhalten und Schizophrenie – treten drastische Störungen des Handlungsbewusstseins auf.

Wenn die eigene Hand verrückt spielt

Beim Fremde-Hand-Syndrom entzieht sich eine Hand der Willenskontrolle. Diese Hand führt zielgerichtete, aber oft unpassende Handlungen aus, ohne dass die betroffene Person dies beabsichtigt. Die Patienten sehen sich außer Stande, das als fremd empfundene Glied zu kontrollieren, und müssen es oft mit physischer Gewalt an unangemessenen Aktionen hindern. In einem oft zitierten Fall bekam eine Frau eine Tasse Tee und erklärte unverzüglich, der Tee sei zu heiß, sie wolle ihn erst etwas abkühlen lassen. Doch kaum hatte sie diese Absicht ausgesprochen, als ihre fremde Hand nach der Tasse griff und sie zum Munde führen wollte. Die Frau musste sie mit der anderen Hand festhalten.

In einem anderen Fall versuchte die fremde Hand einer Patientin, sie zu würgen; die Frau musste sich mit der nicht betroffenen Hand dagegen wehren. Außerdem riss ihr die fremde Hand häufig gegen ihren Willen die Bettdecke weg. Gelegentlich ergriff die fremde Hand auch ein Glas, aus dem die Patientin gerade trinken wollte, und rang mit der gesunden Hand, bis das Getränk verschüttet war. Die Frau meinte, die Hand folge ihren eigenen Gesetzen und sei nicht dem Willen unterworfen.

Bei dieser Störung kann bereits der bloße Anblick eines Gegenstands eine Handlung der fremden Hand auslösen, obwohl dies nicht den Zielen und Absichten des Patienten entspricht. Was ist die Ursache?

Meist leiden die Betroffenen an einer einseitigen Schädigung des medialen frontalen Cortex oder des Corpus callosum, des Balkens, der beide Gehirnhälften verbindet; bei manchen ist sogar beides geschädigt. Im medialen frontalen Cortex liegen sowohl das SMA als auch Teile von MI. Wie erwähnt sprechen experimentelle Befunde dafür, dass unser Bewegungsbewusstsein etwas mit der Verbindung zwischen SMA und MI zu tun hat. Daher könnte eine Schädigung des SMA wie beim Fremde-Hand-Syndrom zur Folge haben, dass eine Hand »ihren eigenen Kopf« hat.

Beim Nutzungsverhalten (utilization behavior) hantieren die Patienten unkontrollierbar mit jedem Gegenstand, der ihnen unter die Augen kommt. Anders als beim Fremde-Hand-Syndrom beschränkt sich das Nutzungsverhalten nicht auf einhändige Aktionen und geht nicht mit fehlendem Bewusstsein einer Bewegungsabsicht einher. Vielmehr rationalisieren die Betroffenen häufig ihre unangemessenen Handlungen, wenn man sie danach fragt. 2002 berichtete Edoardo Boccardi am Ospedale Niguarda Ca'Granda in Mailand über einen faszinierenden Fall:

»Er zeigte auch komplexes (beidhändiges) Nutzungsverhalten, das ebenfalls hauptsächlich von seiner rechten Hand

ausging, wobei sich die linke nach einer gewissen Verzögerung anschloss. Einmal legte der Versuchsleiter absichtlich seine Brieftasche auf den Tisch, während er die Videokamera einstellte. Der Patient erblickte die Brieftasche, nahm alle Kreditkarten und andere Dokumente heraus und las laut daraus vor. Der Versuchsleiter fragte: ›Wem gehört die Brieftasche?‹ – ›Ihnen‹, antwortete der Patient, etwas verblüfft über eine derart banale Frage. Er fuhr aber fort, in der fremden Brieftasche zu stöbern und persönliche Notizen, die der Versuchsleiter darin gelassen hatte, laut vorzulesen.«

Wie beim Fremde-Hand-Syndrom kennt niemand die genaue Ursache des Nutzungsverhaltens. Gesichert ist, dass diese Patienten in der Regel eine beidseitige Läsion der Frontallappen erlitten haben. Solche Läsionen könnten hemmende Prozesse außer Kraft setzen, die eine Person normalerweise daran hindern, alles in ihrer Reichweite anzufassen.

Beschönigter Kontrollverlust

Außerdem können die Patienten der Selbsttäuschung aufsitzen, sie hätten die ausgeführten Handlungen beabsichtigt. Wie Sarah-Jayne Blakemore von der Universität London vermutet, fehlt diesen Patienten das Bewusstsein innerer Ziele und Intentionen für nachfolgende Bewegungen. Die Patienten bemerken, was sie gleich tun werden, quasi erst dann, wenn es schon passiert ist. Da es vorher kein Intentionsbewusstsein gab, muss der Patient sein Verhalten im Nachhinein rationalisieren.

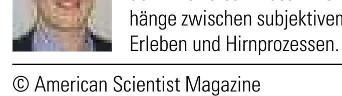
Auch bei Schizophrenie tritt Kontrollverlust auf. Viele dieser Patienten behaupten, eine andere Person oder eine äußere Macht verursache ihre Handlungen, Gedanken, verbalen Äußerungen oder Emotionen. Die Kranken führen Bewegungen aus, ohne sich dessen bewusst zu sein. Blakemore vermutet den Grund für diesen Ausfall des Handlungsbewusstseins in einer Störung des Vorwärtsmodells. Wie erwähnt gleicht das Gehirn eine reale Bewegung mit diesem Modell ab, und solange Voraussage und Ergebnis halbwegs übereinstimmen, entsteht im Gehirn der Eindruck, dass die Person die Handlung bewirkt hat. Ist bei einem schizophrenen Patienten der Vorhersagemechanismus defekt, so kommt keine zutreffende Prognose der Konsequenzen einer Bewegung zu Stande. Infolgedessen wirkt eine selbst erzeugte Bewegung für das Gehirn unerwartet – und genauso stellen es schizophrene Patienten auch dar.

Noch bleibt in vieler Hinsicht rätselhaft, wie das Gehirn an unserem Handlungsbewusstsein mitwirkt. Jedenfalls stellen die hier beschriebenen Experimente den klassischen Begriff des freien Willens in Frage. Wenn zu dem Zeitpunkt, in dem eine Person eine Handlungsintention empfindet, die neurale motorische Aktivität längst im Gange ist, müssen wir uns fragen, wodurch das Gefühl einer Absicht verursacht wird, auf das wir unseren Glauben an Kontrolle gründen.

Vielleicht entsteht dieses Gefühl aus den laufenden Rechenprozessen, die das Vorwärtsmodell erfordert. Wie aus Laborexperimenten und klinischen Untersuchungen hervorgeht, sind Nervensignale, die schon vor Ausführen einer Bewegung den vermuteten Ablauf abschätzen, entscheidend für das bewusste Erleben unserer Handlungen. Nach Meinung der meisten Hirnforscher belegen die hier dargestellten Arbeiten, dass unser Kontrollbewusstsein aus der Art und Weise entsteht, wie die motorischen Hirnareale Bewegungsinformationen verarbeiten. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE





Sukhvinder S. Obhi ist Mitglied der Research Group on Action and Perception der kanadischen Institutes of Health. Er untersucht, wie das Gehirn Handlungen steuert. **Patrick Haggard** lehrt kognitive Neurowissenschaft am University College London. Er erforscht Zusammenhänge zwischen subjektivem Erleben und Hirnprozessen.

Illusion Freiheit. Mögliche und unmögliche Konsequenzen der Hirnforschung. Von Michael Pauen. S. Fischer, Frankfurt 2004

Fühlen, Denken, Handeln. Wie das Gehirn unser Verhalten steuert. Von Gerhard Roth. Suhrkamp, Frankfurt 2001

The relative effects of external spatial and motoric factors on the bimanual coordination of discrete movements. Von S. S. Obhi und P. Haggard in: Experimental Brain Research, Bd. 154, S. 399, 2003

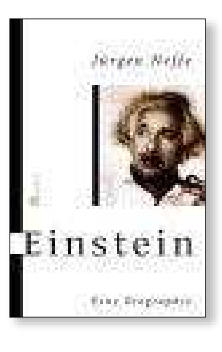
Voluntary action and conscious awareness. Von P. Haggard, S. Clark und J. Kalogeras in: Nature Neuroscience, Bd. 5, S. 382, 2002

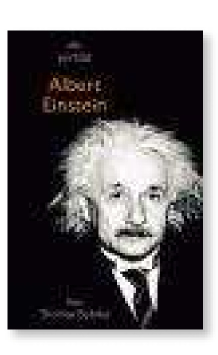
Weblinks zu diesem Thema bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«

WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Jürgen Neffe
Einstein. **Eine Biographie**
Rowohlt, Reinbek 2005. 490 Seiten, € 22,90

Thomas Bührke
Albert Einstein
dtv, München 2004. 191 Seiten, € 10,–





Es ist nicht zu übersehen: 2005 ist das Einsteinjahr. Hundert Jahre, nachdem die Spezielle Relativitätstheorie veröffentlicht wurde, und fünfzig Jahre nach dem Tode Albert Einsteins (1879 – 1955) überbieten sich die Buchläden mit Einstein-Tischen, zahlreiche Fernsehsendungen beschäftigen sich mit dem wohl berühmtesten Wissenschaftler, und selbst das Kundenmagazin der Deutschen Bahn widmete ihm im Februar zwölf Seiten. Wer war der Mann, der als Weltbürger und Querdenker, Pazifist und zugleich geistiger Vater des amerikanischen Atombombenprogramms gilt?

Frappierend und fesselnd zugleich ist der Einstieg, den Jürgen Neffe wählt: Während der Obduktion Einsteins stiehlt der Pathologe Thomas Harvey dessen Gehirn. Etwas detailgenauer, als dem Leser lieb ist, beschreibt der Autor in der Einleitung das kuriose Schicksal des Organs. Nach wenigen Seiten wird allerdings deutlich: Es ist absurd, einen Menschen über seine Biologie verstehen zu wollen. Der Schlüssel dazu liegt vielmehr in seiner Biografie.

Nach diesem gelungenen Auftakt wird der Leser in den folgenden Kapiteln nicht enttäuscht. Im Gegenteil, der langjährige »Geo«- und »Spiegel«-Autor Neffe erzählt die Lebensgeschichte Einsteins ausgesprochen spannend, mit dem Schwerpunkt eher auf dem Menschen als auf dem Physiker. Intelligente Kommentare in schönen Sätzen, angereichert mit zahlreichen Zitaten, machen die Lektüre zum Vergnügen. Gegliedert ist der Text eher thematisch als zeitlich, wodurch die verschiedenen Facetten des Physikgenies besonders anschaulich werden. So ist das Buch weit mehr als eine reine Nacherzählung von Lebensdaten, sondern lässt beim Leser den Menschen Einstein lebendig werden.

In manchen Kapiteln nimmt Neffe, der selbst am Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte in Berlin arbeitet, seine Leser mit auf die Forschungsreisen eines Wissenschaftshistorikers. Im Einsteinarchiv der Hebrew University in Jerusalem oder an seiner letzten Wirkungsstätte in Princeton versuchen Forscher heute das Leben des großen Physikers zu enträtseln. Wie hat sich 1914 der damals 35-Jährige zur Allgemeinen Relativitätstheorie durchgekämpft? Gibt es aus den zahlreichen Affären des Physikers doch noch Nachkommen, deren Existenz verschleiert werden sollte? Vermutlich werden sich nicht mehr alle Fragen klären lassen.

Wer war der Mann, der als Weltbürger und Querdenker, Pazifist und zugleich geistiger Vater des amerikanischen Atombombenprogramms gilt?

Einstein war nicht nur derjenige, der das Theoriengebäude der Physik des 19. Jahrhunderts radikal umbaute, sondern auch ein Frauenheld, Ehemann, Vater und lebenslang ein Kind. Er war auf seine eigene Weise religiös und bekam den Judenhass in der Weimarer Republik zu spüren. Er emigrierte 1933 in die USA, wo er 1939 jenen verhängnisvollen Brief an Präsident Roosevelt mit unterzeichnete, der heute als Auslöser für den Bau der ersten Atombombe gilt. Seine pazifistische Überzeugung verlor er jedoch nicht: »Eine übernationale Regierung scheint die einzige Alternative«, sagte er angesichts des auch von ihm vorausgesehenen und befürchteten atomaren Wettrüstens. Albert Einsteins Leben war ebenso ertragreich wie tragisch.

Was gibt es zu kritisieren an Neffes Werk, an dem sich zukünftige Biografien messen werden müssen? Lediglich zwei Punkte. In dem genau recherchierten Buch fehlt eine Zeittafel mit den wichtigsten biografischen Eckdaten. Und auf Seite 165 versucht sich Neffe an einer Erklärung des Zwillingsparadoxons – und scheitert daran. Was er schreibt, ist zwar nicht falsch, erklärt aber nicht, warum ein Raumfahrer nach seiner Rückkunft weniger gealtert ist als sein daheim gebliebener Zwillingsbruder. Neffes Argument ist nichts weiter als eine schöne Erklärung der Zeitdilatation und darum sowohl auf den Raumfahrer als auch auf seinen Bruder anwendbar. In dieser Symmetrie liegt jedoch das eigentlich Paradoxe. Der auflösende Hinweis, dass nur der Raumfahrer beschleunigen und bremsen muss, fehlt. Mit einem Schmunzeln liest man da auf der Umschlaghülle, dass der Autor sein Physikstudium zu Gunsten der Biologie abgebrochen hat.

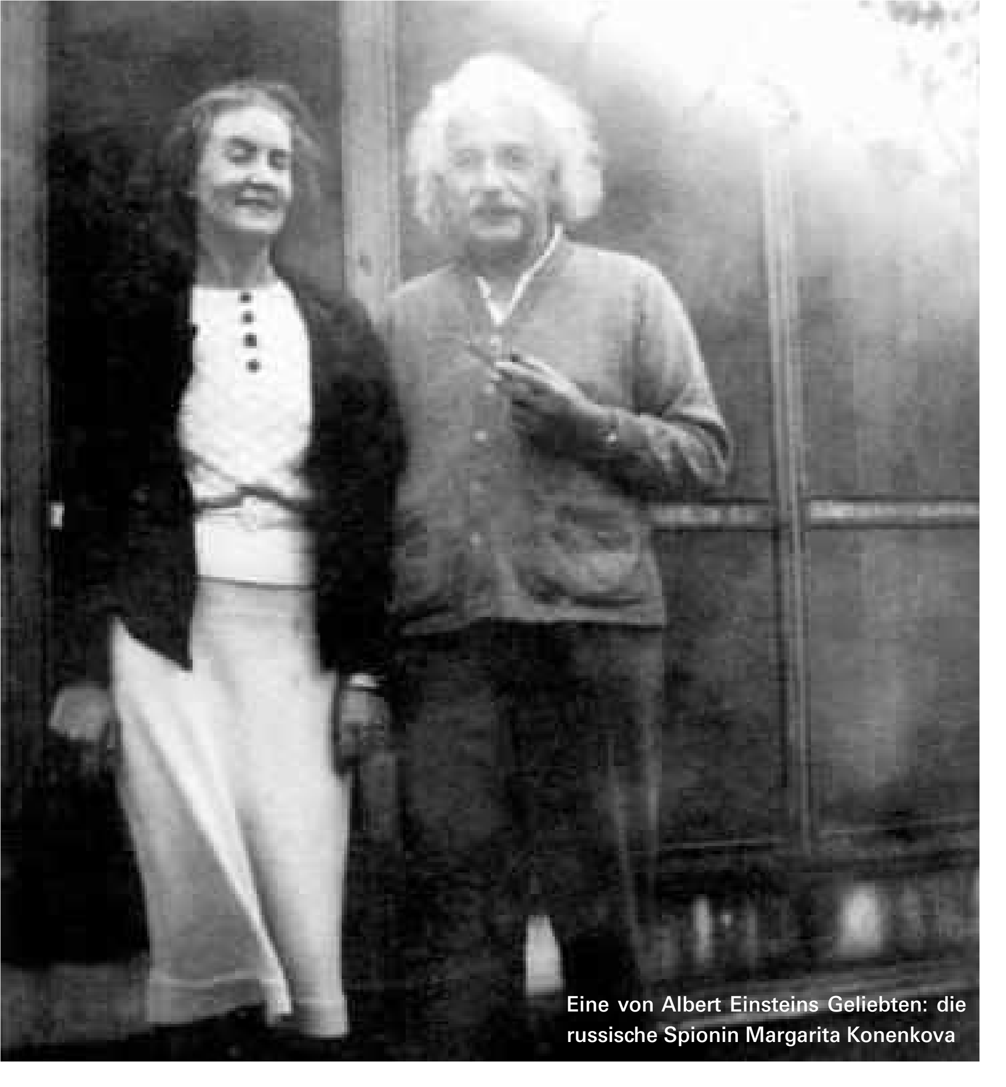
Thomas Bührke, promovierter Physiker und Wissenschaftsredakteur, bietet dagegen einen Einstein-Schnellkurs. Sein Werk ist poppiger aufgemacht als Neffes Buch, die Bilder sind nicht auf einige wenige Bildseiten verbannt, sondern stehen an der zugehörigen Textstelle. Neben dem Haupttext gibt es zahlreiche farbig unterlegte Kästen mit Zitaten, Begriffserklärungen oder biografischen Notizen zu den Personen, die Einsteins Leben begleitet haben. Fast sieht das Buch aus wie ein Artikel in einer Illustrierten.

Leider ist dadurch ein ziemlich verwirrendes Layout entstanden. Immer wieder rutschen die Augen des Lesers in einen Kasten ab, was den Lesefluss erheblich stört. Einen Teil der Arbeit des Autors, nämlich die Fakten zu ordnen und zu verbinden, überlässt Bührke so


Vermischtes

Privatstunden in
Mathematik u. Physik
für Studierende und Schüler erteilt
gründlichst
Albert Einstein, Inhaber des eidgen.
polyt. Fachlehrerdiploms,
Gerechtigkeitsgasse 32, 1. Stock.
Probestunden gratis. ,1977"

Anfänge einer Karriere: Der spätere Nobelpreisträger und Jahrhundertphysiker gibt Nachhilfeunterricht.



Eine von Albert Einsteins Geliebten: die russische Spionin Margarita Konenkova

dem Leser. Dafür ist das Buch garantiert keine Bleiwüste, und vielleicht verführt der eine oder andere Blickfang ja zum Weiterlesen. Man kann es dem Buch nur wünschen, denn der Haupttext ist lesenswert.

Auch Bührkes chronologisch erzählte Geschichte schafft es, dem Leser den Menschen Albert Einstein nahe zu bringen, wobei er etwas mehr Gewicht auf die wissenschaftlichen Leistungen legt. So finden sich in Kurzform auch die üblichen Zeichnungen mit Lichtblitzen und fahrenden Zügen sowie die Zeitdilatationsformel – gerade so viel Relativitätstheorie, wie man mit Mittelstufenmathematik verstehen kann. Hier merkt man, dass der Autor selbst Physiker ist. Natürlich genügen die wenigen Seiten nicht, um die Einstein'schen Theorien voll zu verstehen, aber sie geben doch eine Idee, was denn so revolutionär an den beiden Säulen der modernen Physik war.

Beide Bücher sind empfehlenswert – und so verschieden, dass sie einander nicht ernsthaft Konkurrenz machen.

Stefan Gillessen

Der Rezensent ist promovierter Physiker und Postdoc am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik in Garching.



CHEMIE

Kristin Mädefessel-Herrmann, Friederike Hammar und Hans-Jürgen Quadbeck-Seeger

Chemie rund um die Uhr

VCH-Wiley, Weinheim 2004. 231 Seiten, € 19,90

Die Chemie ist die Wissenschaft mit dem vermutlich größten Imageproblem. Unter Schülern ist sie als schwierig verhasst; in einer chemischen Fabrik sieht das Volk in erster Linie eine Giftmischungs- und Umweltverschmutzungsanlage und nicht die Quelle für zahlreiche hoch geschätzte Produkte wie Medikamente, Kunststoffe und die geile Metalliclackierung am Auto.

Die professionellen Vertreter des Fachs haben auf diesen Missstand lange mit Verstörung und Rückzug in die Elfenbeintürme und hinter die Fabriktore reagiert. Im Angesicht der Bildungskrise und einer anwachsenden internationalen Konkurrenz haben sich Politik und chemische Verbände entschieden, mit einer Imagekampagne für die Wissenschaft Chemie zu werben. Ein Baustein dieser Bemühungen, zu denen auch Tage der offenen Tür in chemischen Fakultäten und spezielle Vorlesungen für ein Laienpublikum gehören, ist das vorliegende Buch, für das sich das Bundesministerium für Bildung und Forschung und die größte Standesorganisation der Branche, die Gesellschaft Deutscher Chemiker (GdCh), zusammengetan haben. ▷



Der Stoff für schöne Beine: Polyamid (»Nylon«) wird durch Polykondensation von Adipinsäure und Hexamethylendiamin synthetisiert.



Faszinierend: Flachbildschirme für das Fernsehen der Zukunft

Das Ergebnis dieser Imagekampagne ist eine »goldene Kugel«, die ihr Ziel sicher nicht verfehlen wird. Auf den Textseiten brennen die beiden Journalistinnen Kristin Mädefessel-Herrmann und Friederike Hammar sowie Hans-Jürgen Quadbeck-Seeger, der ehemalige Forschungsvorstand der BASF, ein Feuerwerk in allen Farben des Regenbogens ab. Man liest von Diamanten und von Schokolade, von Erd-, Schmier- und Speiseöl, von Heilmitteln, von Nylon, Teflon und Kartoffelkäfern, und zwar so, dass jeder Zehnjährige das meiste verstehen kann. Wie giftig ist das viel diskutierte Acrylamid, und was ist das überhaupt? Woraus setzt sich ein Autolack zusammen, und wieso klebt er? Was sind Geschmacksverstärker, und wie funktionieren künstliche Süßstoffe? Und vieles mehr – die Liste ist schier endlos. Die Botschaft ist klar: Chemie ist überall!

Auch wenn es darum geht, sich oder andere mit Vorsatz zu vergiften: Das Buch enthält Kapitel über Gifte »von Arsen bis Zyankali«, Kampfstoffe sowie legale und illegale Genussdrogen.

Bei all dem gelingt den Verfassern der Spagat zwischen Unterhaltung und Information. Auf chemische Formeln verzichtet der Text vollkommen; sie tauchen lediglich in höchst ästhetischer Form, die Schönheit der molekularen Welt greifbar werden lassend, in den unzähligen farbigen Abbildungen auf. Bei der Ausstattung des Buchs hat man sich nicht lumpen lassen und das Beste aus den Bildarchiven herausgeholt. Papier, Druck und Einband verdienen das Prädikat »bibliophil«.

Ein ambitioniertes Projekt wurde in brillanter Weise umgesetzt. Wenn »Chemie rund um die Uhr« nicht das Interesse an dieser Diszplin weckt, schafft es auch kein Lehrer. So viel Didaktik wie zwischen die beiden Buchdeckel dieses Titels passt in kein Klassenzimmer. Kein Chemielehrer, keine Schulbibliothek sollte darauf verzichten. Abbildungen und Textauszüge lassen sich prächtig in den Chemieunterricht einbauen. Themen für Referate, Projektwochen und Exkursionen springen einen förmlich an. Lediglich ein Stichwortverzeichnis fehlt.

Ein »coffee-table book« im besten Sinne. Nur könnte der Kaffee kalt werden, weil das Buch so spannend ist – bis einen auf Seite 113 der Essay »Geliebte braune Brühe« wieder daran erinnert.

Thomas Lazar

Der Rezensent hat in Biochemie promoviert und ist freischaffender Sachbuchautor und Übersetzer in Göttingen.

KÜNSTLICHE INTELLIGENZ

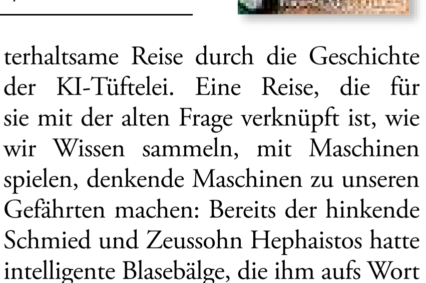
Pamela McCorduck

Machines Who Think

A Personal Inquiry into the History and Prospects of Artificial Intelligence

A K Peters, Natick (Massachusetts) 2004. 598 Seiten, $ 19,95





Bereits im Titel steckt Stoff für ein paar grüblerische Nachmittage: »Maschinen, die denken«, provokant mit dem englischen Relativpronomen »who« formuliert, das doch für Belebtes, sogar Vernunftbegabtes reserviert ist. Denken Maschinen denn?

Ja, sagt Pamela McCorduck in ihrer Nacherzählung der Geschichte der künstlichen Intelligenz (KI). Fußball spielende Roboter, Schach spielende Computerprogramme, »Such-Bots«, die auf kluge Weise Datenbanken durchstöbern – das sind alles Denker.

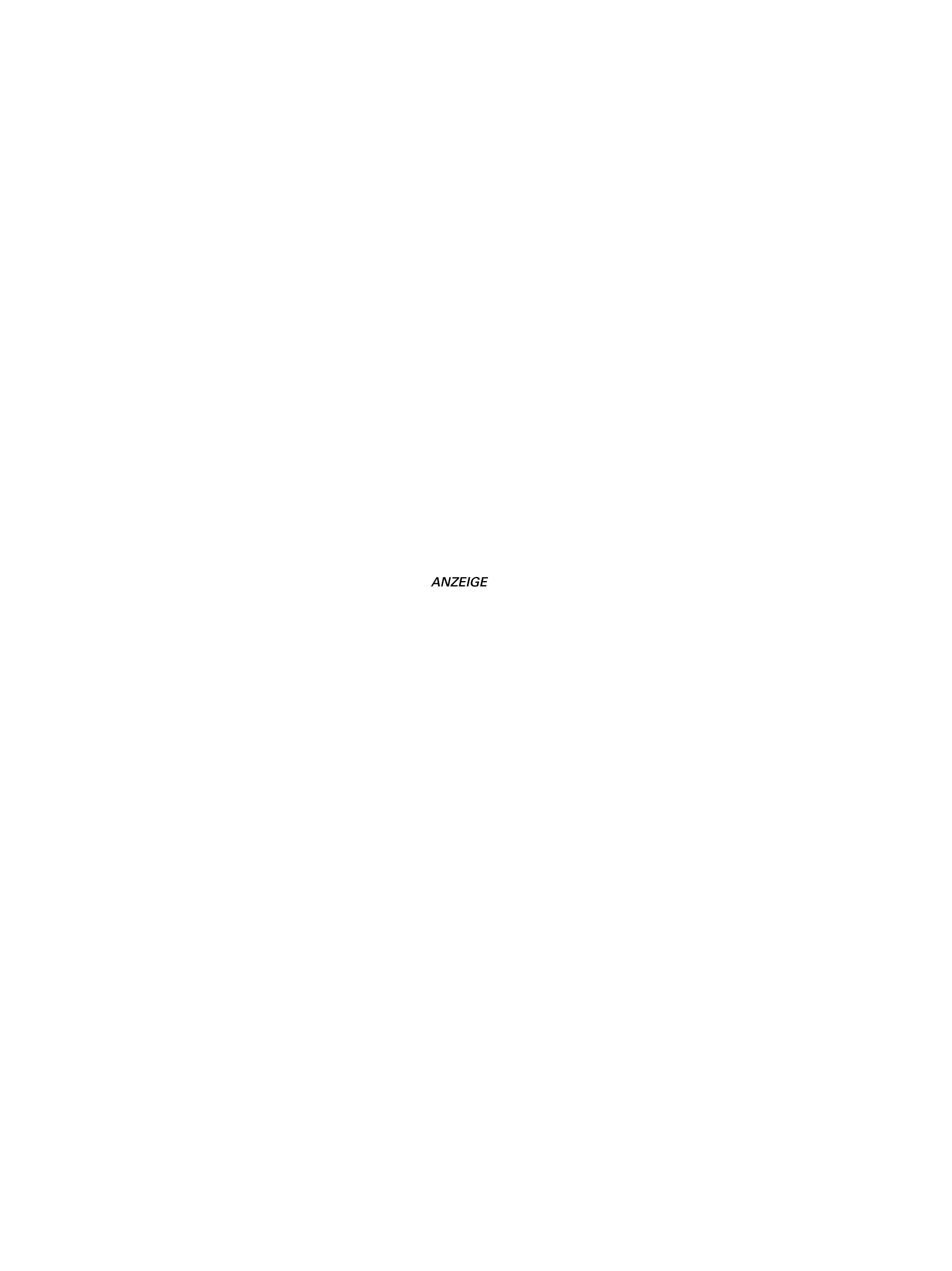
Allerdings nutzen sie ihre künstlichen Hirne auf eigene Art. Maschinendenken kann ganz anders ablaufen als Menschendenken und trotzdem Denken sein, so das Credo der Autorin. Um das zu zeigen, entfacht sie ein Denkmaschinen-Feuerwerk: Sie hat klug beobachtet, kennt die KI-Szene (zumindest in den USA) und nimmt uns mit auf eine unterhaltsame Reise durch die Geschichte der KI-Tüftelei. Eine Reise, die für sie mit der alten Frage verknüpft ist, wie wir Wissen sammeln, mit Maschinen spielen, denkende Maschinen zu unseren Gefährten machen: Bereits der hinkende Schmied und Zeussohn Hephaistos hatte intelligente Blasebälge, die ihm aufs Wort gehorchten.

McCorduck berichtet vom Enthusiasmus der Pioniere wie des Kybernetikers Norbert Wiener (1894–1964) und des Mathematikers John von Neumann (1903–1957), auf den die Idee eines gespeicherten Computerprogramms zurückgeht; beide sahen sich durchaus in der Tradition eines Rabbi Löw (1520–1609), der im frühneuzeitlichen Prag den Golem erschuf. Sie erzählt von der folgenschweren Dartmouth-Konferenz 1956, bei der Marvin Minsky und andere, auch heute noch aktive Wortführer entschieden: Ein künstliches Hirn kann wie ein menschliches arbeiten, ohne notwendigerweise wie ein solches gebaut zu sein. Künstliches Denken kann also auf algorithmischem Weg funktionieren – indem ein Programm Befehle ausführt, genauer: Symbole verarbeitet. Nebenbei erklärt McCorduck auch dem technisch unwilligen Leser, wie das legendäre »Psychotherapie«-Programm Eliza (das zwar unintelligent, aber überraschend wirkungsvoll plapperte) und all die anderen Maschinchen im Inneren ticken.

Auch die Kritiker lässt sie zu Wort kommen, Joseph Weizenbaum beispielsweise, den schon der Erfolg seiner Eliza ängstigte: Offenbar seien Menschen viel zu schnell bereit, in Maschinen Intelligenz – sogar Gefühl! – zu vermuten, und deswegen sollten wir lieber die Finger von der KI lassen, um uns nicht selbst eine Falle zu stellen.

Das ist alles wunderbar durchdacht und mit Herzblut berichtet. Allerdings nicht neu: Der größte Teil des Buchs erschien bereits 1981, wurde in den USA ein Bestseller und in viele Sprachen übersetzt, auch ins Deutsche (»Denkmaschinen«).

Die Neuauflage hat McCorduck mit einem Nachwort versehen. Auf diesen ▷


ANZEIGE

▷ 100 Seiten durcheilt sie das fehlende Vierteljahrhundert: Die »Eiszeit« in den 1980ern, als sich niemand mehr von denkenden Maschinen zu reden traute – zu grandios waren selbst »einfache« Projekte, wie die maschinelle Übersetzung, mitsamt den investierten Forschungsmillionen den Bach hinuntergegangen. KI galt als Hort der Hybris und der haltlosen Versprechungen, die Idee, ein künstliches Gehirn zu erstellen, als absurd. Die Forschungsförderung, auch des Militärs, versiegte.

Danach kam wieder Leben in die Eiswüste: »Deep Blue« schlug den Schachmeister Garri Kasparow; das künstliche Denken war plötzlich wieder salonfähig. Und auch die Ängste waren wieder da: Bill Joy, Erster Wissenschaftler des Betriebssysteme-Bauers Sun Microsystems, belebte passgenau vor der Jahrtausendwende auch deutsche Feuilletons, indem er vor einer Machtübernahme durch die Maschinen warnte.

All das gibt einen guten Überblick. Die Inspiration der Erstauflage hat das Nachwort aber nicht: McCorduck reiht Ereignisse aneinander, spürt jedoch den tiefer liegenden Strömungen wenig nach.

Überhaupt wirkt es verlegerisch ungeschickt, die letzten 25 Jahre als Appendix an das große Werk zu fügen. Denn in diesen Jahren hat eine Zäsur stattgefunden: Das »heroische« Zeitalter der KI – wie McCorduck es charakterisiert – ist in den meisten Labors längst abgeblasen worden. Heute spricht kaum noch jemand davon, eine intelligente Maschine schaffen zu wollen; selbst das Wort »Intelligenz« meidet man eher, um weder falsche Hoffnungen noch unnötige Ängste zu schüren.

Das Zeitalter der großen Versprechungen in der KI ist vorbei. Und das ist gut so

Bis auf wenige Ausnahmen wie den Roboterbauer Hans Moravec, der vollintegrierte und gesellschaftsfähige Kunstmenschen unverdrossen für das Jahr 2050 prophezeit, ist die KI pragmatisch geworden. Sie hat sich, wie McCorduck durchaus bemerkt, in viele Teildisziplinen aufgespalten und konzentriert sich aufs Machbare: Der Fußballroboter soll den Ball treffen, der Kanalkrabbler das Leck im Rohr finden, der Suchalgorithmus das richtige Ergebnis liefern, die Wissensbasis funktionieren. »Heroische« Großprojekte werden da eher mit schiefem Grinsen angesehen, wie die Wissensbasis »CyC« des Stanford-Professors Douglas Lenat, in der das gesamte Alltagswissen eines Menschen in Form von Regeln wie »Schnee→weiß« und »Zahnarzt→gelegentlich Schmerzen« codiert werden soll, um einer Maschine dadurch menschenähnliches Wissen einzuhauchen. Pamela McCorduck aber referiert über diese seit 1994 andauernde Hamsterarbeit stoisch ohne einen Anflug von Kritik.

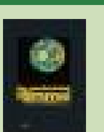
Auch die Hinwendung zum Körper schwingt bei ihr implizit mit, wenn sie die neuen Roboter bespricht, wird aber nicht als der Trend, der er ist, gewürdigt: *Embodied AI*, »verkörperte KI«, ermöglicht durch die boomende Sensortechnik, lagert viele Funktionen der zentralen Steuerung in die Peripherie aus, lässt also, anthropomorph gesprochen, den Körper zu Wort kommen und entlastet den Kopf. Ein schönes Pferd, auf das McCorduck hätte aufspringen können: Schließlich ist es genau ihr Metier, den Computer nicht bloß als Werkzeug, sondern als Erkenntnisobjekt zu nutzen, wie der Mensch sich selbst sieht – denn auch in die Philosophie haben ja Diskussionen zur Körperlichkeit Einzug gefunden.

Weil sich so vieles geändert hat, wäre es vielleicht klug gewesen, ein neues Buch zu schreiben, statt einfach die neuen Entwicklungen an die alten anzuhängen. Und es ist wirklich schade, dass die Autorin, wie sie im Vorwort schreibt, nicht die Zeit fand, über die Grenzen der USA hinauszugehen. Auch in Lund, Darmstadt und Tokio werden interessante Dinge gebaut. Jedenfalls ist es inzwischen klar: »Machines who think« – dieser Satz ist an den Schläfen so grau wie viele der Pioniere der KI aus dem vergangenen heroischen Zeitalter. Heute ergänzt man den Ausspruch mit einem »nun ja, irgendwie – kind of«, zieht den Laborkittel an und schraubt weiter. Das Zeitalter der großen Versprechungen ist vorbei. Und das ist gut so.

Annette Leßmöllmann

Die Rezensentin ist Redakteurin bei Gehirn&Geist in Heidelberg.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Harald Meller (Hg.)
Der geschmiedete Himmel
Die weite Welt im Herzen Europas vor 3600 Jahren
Theiss, Stuttgart 2004, 206 Seiten, € 24,90 (bis 30. 4. 2005)

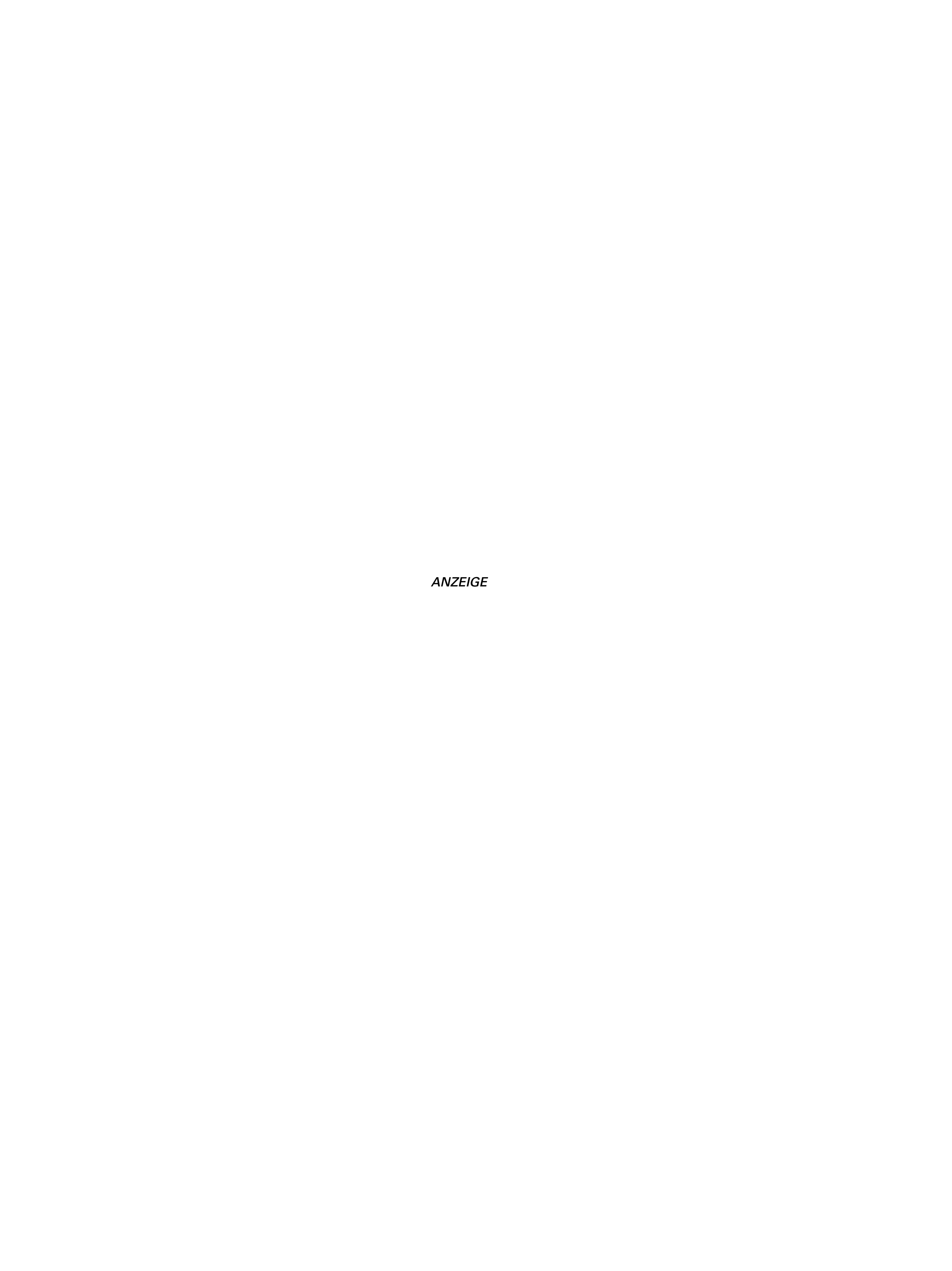
Bedeutende Funde der Archäologie sind oft klein und unscheinbar, und die Öffentlichkeit nimmt sie kaum wahr. Da ist die Himmelsscheibe von Nebra eine spektakuläre Ausnahme. Der Bedeutung des Fundes trägt der Katalog zur Landesausstellung »Der geschmiedete Himmel« schon in Gestaltung und Ausstattung Rechnung: Die aufwändigen, großformatigen Fotos kommen durch das schlichte und klare Layout des Buchs besonders gut zur Geltung.

Zusätzliche Karten, Lebensbilder, aufschlussreiche Grafiken und Fundzeichnungen vervollständigen den visuellen Eindruck. Der Katalog bindet die Erkenntnisse zur Himmelsscheibe in Wort und Bild in ihren weiteren räumlichen Kontext ein. Alle Aufsätze sind durchweg in einer auch dem Laien verständlichen Sprache verfasst.

Aus der Rezension von Dr. Almut Mehling

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Vermittlung	■■■■■
Verständlichkeit	■■■■■
Lesespaß	■■■■
Preis/Leistung	■■■■■
Gesamtpunktzahl	24

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**


ANZEIGE



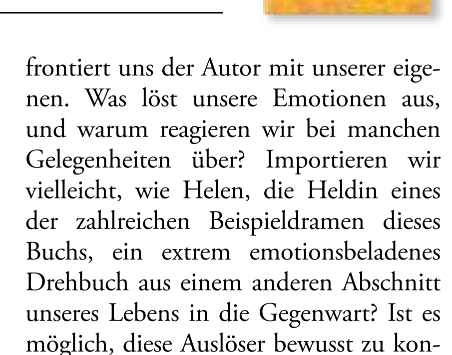
PSYCHOLOGIE

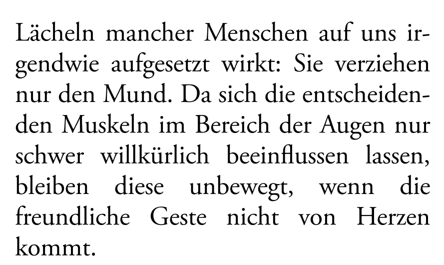
Paul Ekman

Gefühle lesen

Wie Sie Emotionen erkennen und richtig interpretieren

Aus dem Englischen von Susanne Kuhlmann-Krieg.
Elsevier Spektrum Akademischer Verlag, München 2004. 363 Seiten, € 25,–





Titel, Inhaltsverzeichnis und Klappentext verheißen eine spannende Lektüre. Paul Ekman, einer der bekanntesten amerikanischen Psychologen und Experte für nonverbale Kommunikation, scheint den fein gewebten Teppich der Emotionen in seinem Buch systematisch aufrollen zu wollen. Seine Ziele sind ehrgeizig: Wir sollen uns selbst und andere besser verstehen – auch subtile emotionale Signale unserer Gesprächspartner, die nur für Bruchteile von Sekunden über deren Gesichter huschen oder gar von ihnen unterdrückt werden. Wir sollen lernen, in bestimmten Situationen angemessener zu reagieren. Ekman will uns Wege aufzeigen, Emotionen besser zu nutzen. Unsere Gefühle seien schließlich kein Blinddarm, kein rudimentärer Apparat aus längst vergangenen Zeiten, den wir entfernen sollten, sondern der Mittelpunkt unseres Lebens. Viele, zum Teil lebenswichtige Entscheidungen werden aus dem Bauch heraus getroffen, nicht mit dem Kopf.

Bevor es daran geht, die Gefühlswelt des Gegenübers zu durchleuchten, konfrontiert uns der Autor mit unserer eigenen. Was löst unsere Emotionen aus, und warum reagieren wir bei manchen Gelegenheiten über? Importieren wir vielleicht, wie Helen, die Heldin eines der zahlreichen Beispieldramen dieses Buchs, ein extrem emotionsbeladenes Drehbuch aus einem anderen Abschnitt unseres Lebens in die Gegenwart? Ist es möglich, diese Auslöser bewusst zu kontrollieren?

Paul Ekman gibt sich größte Mühe, uns für emotionale Botschaften zu sensibilisieren. Dabei reduziert er Trauer, Zorn, Überraschung, Angst, Ekel, Verachtung und Freude wissenschaftlich nüchtern zu bloßen Muskelbewegungen – leider erst im hinteren Teil des Buchs. Denn eines wird im Lauf der Lektüre zweifellos klar: Die Gefühlswelt ist komplex und durch sie einen roten Faden zu legen sehr schwer. Zwischen ineinander verschachtelten Beispielen und Querverweisen auf spätere Kapitel verlangt Ekman der Konzentration des Lesers einiges ab. Kein Wunder, fasst er doch in seinem Buch 40 Jahre Forschungsarbeit zusammen.

Zum Glück spart er nicht an Fotomaterial und praktischen Übungen, die das Gesagte illustrieren. Was die Analyse von Gesichtsausdrücken angeht, hat sich kein anderer bisher derart ins Detail begeben. Endlich erfahren wir, warum das Lächeln mancher Menschen auf uns irgendwie aufgesetzt wirkt: Sie verziehen nur den Mund. Da sich die entscheidenden Muskeln im Bereich der Augen nur schwer willkürlich beeinflussen lassen, bleiben diese unbewegt, wenn die freundliche Geste nicht von Herzen kommt.

In solchen Feinheiten liegt das Besondere des Buchs. Schade, dass sie oftmals in der Fülle anderer Informationen untergehen, von denen viele weder neu noch sonderlich erstaunlich sind. »Wir entscheiden genauso wenig bewusst darüber, wie wir in einem emotionalen Zustand aussehen und klingen, … wie wir darüber entscheiden, wann wir emotional reagieren. Aber wir können lernen, emotionales Verhalten, das wir im Nachhinein bereuen würden, zu dämpfen.« Wer hätte das gedacht.

Umso verblüffender wirkt der Test am Ende (Bilder). Wer versucht, die mimischen Gesten zu entschlüsseln, die Ekmans Tochter Eve in 14 Fotos übermittelt, wird seine Grenzen schnell erkennen. Man fühlt sich verpflichtet, das Buch noch einmal von vorne anzufangen. Vielleicht wird ja im zweiten Durchgang so manches klarer?

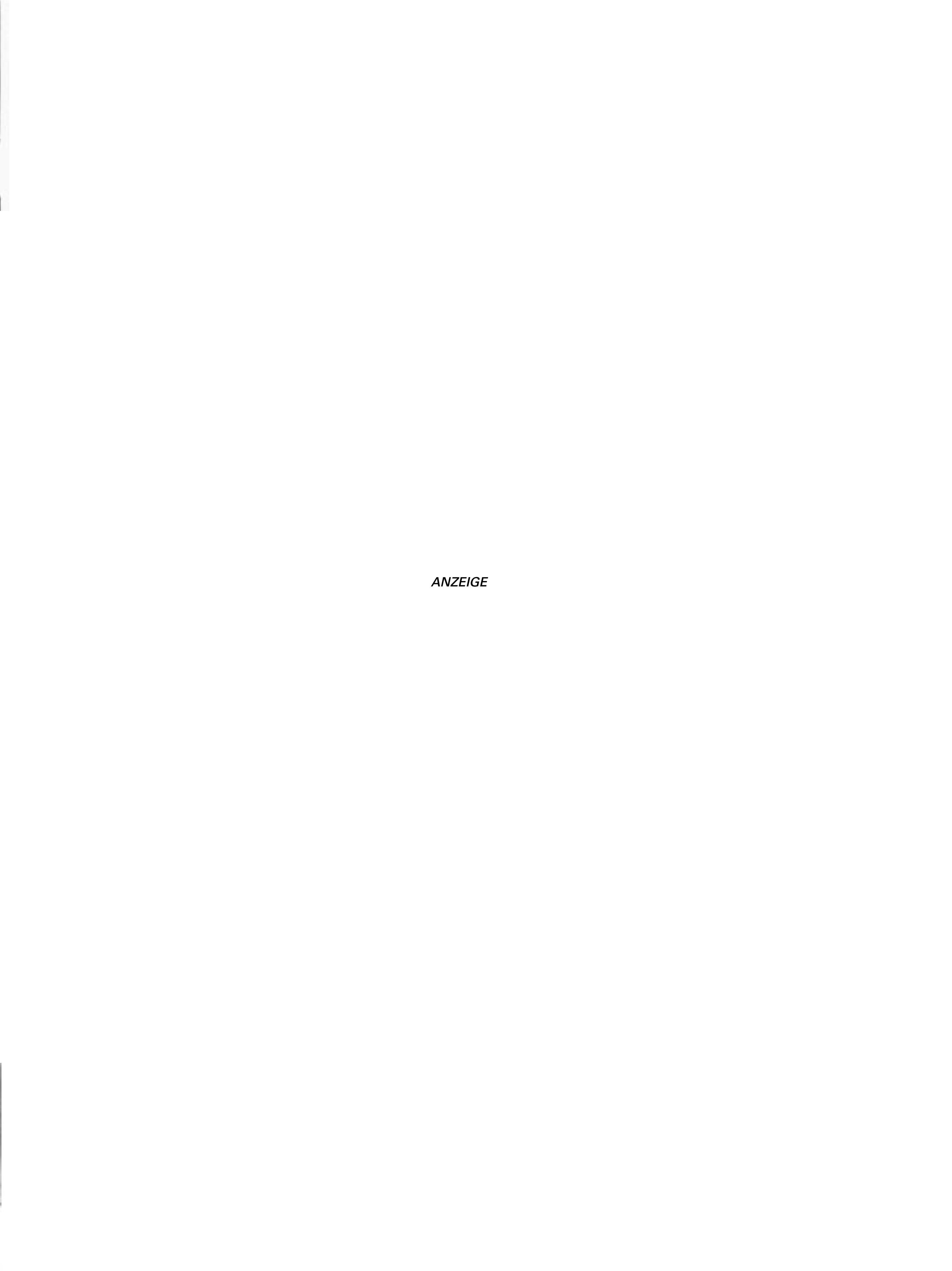
Zu hoffen bleibt allerdings, dass es dem Leser dabei nicht ergeht wie der Hauptfigur in einer Gesellschaftssatire von Martin Suter. »Geri ist meist so damit beschäftigt, seine Mitmenschen zu beobachten, dass er sich manchmal wochenlang ganz aus den Augen verliert.« Obwohl – so packend ist die Lektüre dann doch wieder nicht.

Katharina Grund

Die Rezensentin ist Diplomgeografin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.

Der Selbsttest für den Leser: Finden Sie Trauer, Ekel, Angst, Zorn, Verärgerung, Überraschung, Zufriedenheit und Geringschätzung in diesen Gesichtern!




ANZEIGE

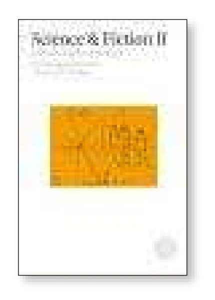
AUSSERIRDISCHES

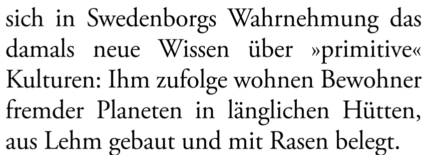
Thomas P. Weber (Hg.)

Science & Fiction II

Leben auf anderen Sternen

Fischer Taschenbuch-Verlag, Frankfurt am Main 2004. 288 Seiten, € 13,90





Erlauben Sie mir, Madame, Ihnen zu sagen, dass Sie von den Bewohnern der Venus noch keinen klaren Begriff haben.« Madame hatte im Jahr 1686 vermutet, diese glichen den Mauren von Granada, sonnenverbrannt, voll von Geist und Feuer und stets verliebt. In seinen »Entretiens sur la pluralité des mondes« belehrt der französische Literat Bernard le Bovier de Fontenelle seine Gesprächspartnerin, dass die Venusianer angesichts der Hitze auf ihrem Planeten die maurischen Eigenschaften noch in weit höherem Maße verkörpern: »Unsere Mauren wären dort nur Lappländer und Grönländer – der Kälte und des Stumpfsinns wegen.«

Gibt es die Außerirdischen, und wenn ja, wie sehen sie aus? Zu letzterer Frage warteten bereits Autoren des 17. Jahrhunderts mit allerhand erstaunlichen Details auf. Das zeigt die vorliegende Aufsatzsammlung, die einen Bogen von der frühen Neuzeit bis zum Beginn des 21. Jahrhunderts spannt. Theologen und Philosophen, Physiker, Biologen und – last not least – auch Wissenschaftsredakteure haben dazu beigetragen.

Aliens – genauer: die verbreiteten Vorstellungen von ihnen – sind immer auch Kinder ihrer jeweiligen Epoche. Das wird an dem schwedischen Naturwissenschaftler Emanuel Swedenborg (1688–1772) deutlich, der hier vom Paderborner Religionswissenschaftler Bernhard Lang vorgestellt wird. Unübersehbar mischt sich in Swedenborgs Wahrnehmung das damals neue Wissen über »primitive« Kulturen: Ihm zufolge wohnen Bewohner fremder Planeten in länglichen Hütten, aus Lehm gebaut und mit Rasen belegt.

Kein Zufall darum, dass die uns vertrautere Idee von hochtechnisierten kosmischen Zivilisationen erst im Zuge unseres eigenen technologischen Fortschritts aufkam. Ihre Ursprünge führt der Leipziger Literaturprofessor Elmar Schenkel unter anderem auf H. G. Wells' »The War of the Worlds« von 1897 zurück.

Schade, dass Thomas P. Webers »außerirdischer« Band so irdische Schwächen hat. Das gemeinsame Thema und die chronologische Sortierung halten die qualitativ uneinheitlichen Texte nur mit Mühe beisammen. Swedenborgs Visionen, die dieser in Trance gewonnen haben will, stehen neben einem kaum über das Deskriptive hinausgehenden Beitrag zu Steven Spielbergs Filmwesen »E. T.« und Ridley Scotts »Alien«. Der literaturwissenschaftlich angelegte Aufsatz »Science Fiction im Barock« steht unverbunden neben Ausführungen zur bevorstehenden Entwicklung einer »universellen Biologie«.

Gleichwohl hat »Science & Fiction II« viel zu bieten. Wie beantwortete etwa das 16. Jahrhundert die Frage, ob die Vielzahl der Welten bewohnt ist? Wie Patricia Fara, Fellow des Clare College im britischen Cambridge, in »Vervielfältigtes Leben« schreibt, galt nicht wenigen Theologen als eitler Hochmut, zu glauben, dass Gott das Universum allein darum geschaffen habe, damit der Mensch seinen Platz darin finde. Besonders aufschlussreich entfaltet sich die Debatte in Laura J. Snyders »William Whewell und die Vielzahl der Welten«. Detailliert vollzieht sie nach, wie ein Verfechter der Hypothese belebter fremder Welten sich zu deren entschiedenem Gegner entwickelte.

Und was glaubt die Gegenwart über das Thema zu wissen? Während viele Naturwissenschaftler nach belastbaren Fakten suchen, gehen manche ihrer Kollegen eher abseitige Wege. Ulf von Rauchhaupt, Redakteur bei der »Frankfurter Allgemeinen Sonntagszeitung«, stellt das Projekt Seti *(search for extraterrestrial intelligence)* vor, das mit Hilfe von Radiowellen nach außerirdischer Intelligenz fahndet (Spektrum der Wissenschaft 1/2002, S. 109). Immer noch der wissenschaftlichen Methode verpflichtet, wolle es – zunehmend von US-Computermilliardären und New-Age-Vertretern beeinflusst – mittlerweile auch weltanschauliche Orientierung bieten: Kontaktaufnahme wird zum Etappenziel auf der Suche nach dem Sinn des Lebens, erreichbar durch die Kommunikation mit spirituell fortgeschritteneren Zivilisationen.

Außerirdische sind stets auch Kinder ihrer eigenen Epoche

Im Schlusskapitel bricht auch noch die »Diegesis der Mathesis in der Science Fiction der Jahrtausendwende« über den Leser herein – ein furioser, von FAZ-Redakteur Dietmar Dath mit Witz geschriebener Ritt durch das Gelände der analytischen Philosophie. Können wir mit völlig andersartigen Wesen überhaupt kommunizieren? Müssen sie möglicherweise mit einem anderen Periodensystem der Elemente leben? Dass solche Fragen ebenso beiläufig aufgeworfen wie beantwortet werden, tut dem Vergnügen keinen Abbruch – eher schon, dass der Leser noch einmal auf die Schnelle mit völlig neuen Gedanken konfrontiert wird, um dann unvermutet ins Literaturverzeichnis entlassen zu werden.

Darum soll wenigstens dieser Beitrag nicht mit einem neuen, sondern einem schon ziemlich alten Gedanken schließen. Der französische Astronom Jerôme Lalande schrieb 1771 kurz und prägnant: Man würde »beim Anblick einer Schafherde in der Ferne nie die Schlussfolgerung ziehen, einige Schafe hätten statt Eingeweide Steine in ihrem Inneren. Ebenso müssen die Planeten bewohnt sein, da sie der Erde so ähnlich sind«. ◁

Thilo Körkel

Der Rezensent ist Diplomphysiker und Wissenschaftsjournalist und lebt in Frankfurt am Main.



Alfred Russel Wallace (1823–1913), bekannt geworden als Entdecker der Evolution parallel zu Charles Darwin, schuf eine Ideologie »aus einem Guss«, zu deren Grundlagen Spiritismus, Sozialismus und ein Universum ohne außerirdische Intelligenzen gehörten.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

Arithmetische Primzahlfolgen beliebiger Länge

In dem Unregelmäßigsten, das die Zahlentheorie kennt, der Verteilung der Primzahlen, steckt ein Hauch von Regelmäßigkeit.

Von Christoph Pöppe

Eigentlich sind Primzahlen etwas sehr Regelmäßiges. Es sind nämlich genau die Zahlen, die nicht zusammengesetzt, das heißt Produkt von zwei oder mehr Faktoren sind. Die zusammengesetzten Zahlen aber sind so regelmäßig, wie man es sich nur wünschen kann: Alle Vielfachen von 13, sprich alle zusammengesetzten Zahlen, die 13 als einen ihrer Faktoren haben, stehen in gleichen Abständen auf der Zahlengeraden: 26, 39, 52, 65, 78, … Der stets gleiche Abstand beträgt 13 – was sonst? Nimmt man einen Kamm, dessen Zinken den Abstand 13 voneinander haben, und setzt ihn auf die richtige Stelle der Zahlengeraden, so treffen die Zinken lauter Vielfache von 13 und damit bestimmt keine Primzahl – allenfalls die Dreizehn selbst, wenn man den Kamm mit der linkesten Zinke ein Stück zu weit nach links setzt. Und dasselbe gilt natürlich auch mit jedem anderen Zinkenabstand als 13.

Der vornehme Ausdruck für einen Kamm mit konstantem Zinkenabstand ist »arithmetische Folge«. Ein beliebtes Schulbuchbeispiel ist die Füllung eines Sparstrumpfs, in den die Großmutter jeden Monat denselben Betrag hineintut. (Auf einem Sparkonto kämen Zinsen dazu, aber die kriegen wir erst in der nächsten Stunde.) Theoretisch könnte das unendlich lange so weitergehen; es wäre auch nichts dagegen einzuwenden, wenn unser Dreizehnerkamm nach rechts unendlich lang wäre.

Wir basteln uns nun zu jeder Primzahl p einen unendlich langen Kamm mit dem Zinkenabstand p und gehen damit genau einmal über die Zahlengerade, sodass wir genau die Vielfachen von p wegnehmen, nicht aber p selbst. Die Auskämmprozedur hat einen ehrwürdigen Namen: »Sieb des Eratosthenes«, denn der antike griechische Mathematiker Eratosthenes (276 – 194 v. Chr.), nach dem sie benannt ist, dachte mehr an verschiedene Siebe, durch deren Maschen die zusammengesetzten Zahlen fallen, als an Kämme. Aber darauf kommt es nicht an.

Wenn die Nichtprimzahlen so regelmäßig sind, dann müsste doch das, was übrig bleibt, wenn man sie alle weggekämmt hat, auch sehr regelmäßig sein, oder? Nicht wirklich.

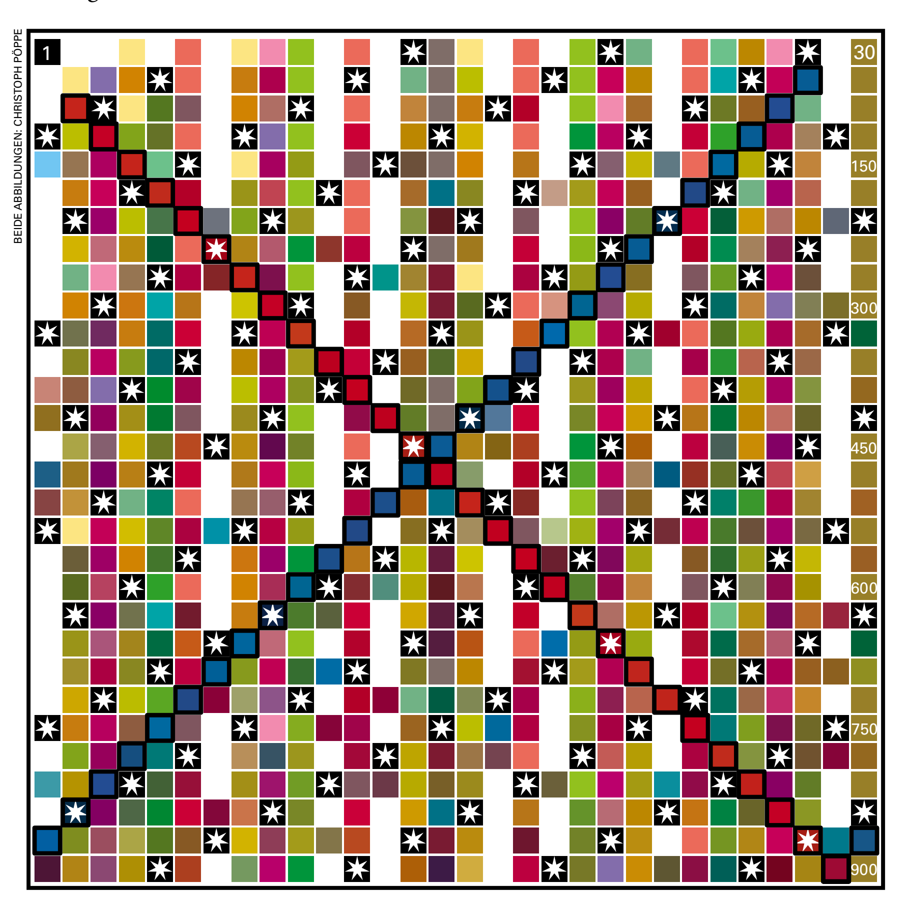
Nachdem alle Kämme über die Zahlengerade hinweggegangen sind, sieht die sehr unregelmäßig gerupft aus, als hätte der Zufall bestimmt, welche Zahlen die Prozedur überstehen. Primzahlen sind so etwas wie die Singles, die keinen Partner (Teiler) abgekriegt haben. Dafür gibt es immer viele verschiedene Gründe, die in ihrer Vielfalt vom Zufall kaum zu unterscheiden sind.

Dieser Widerspruch zwischen streng regelmäßigem Bildungsgesetz und der scheinbaren Regellosigkeit der Primzahlen hat viele Mathematiker nicht ruhen lassen und quält zahlreiche Amateure noch heute. Irgendeinen Trick müsste es doch geben, eine Formel, die zum Beispiel alle Primzahlen der Reihe nach ausspuckt, wenn man eine natürliche Zahl nach der anderen hineinsteckt. Oder die wenigstens für jede natürliche Zahl, die man hineinsteckt, eine Primzahl liefert.

Oder es müsste Kämme geben, deren Zinken sämtlich auf Primzahlen zeigen. Beliebig lange Kämme, wohlgemerkt, denn dreizinkige wie {7, 13, 19} oder vierzinkige wie {11, 17, 23, 29} zu finden ist nicht schwer. Diese Vermutung hatte – in allgemeinerer Form – der legendäre Paul Erdős (1913 – 1996) gemeinsam mit seinem ungarischen Landsmann und langjährigen Mitarbeiter Paul Turán (1910 – 1976) bereits 1936 aufgestellt. Seitdem haben sich viele Zahlentheoretiker an der Frage die Zähne ausgebissen.

Umso größer ist die Begeisterung der Fachwelt über die Lösung des Problems: *Es gibt beliebig lange arithmetische Folgen, die nur Primzahlen enthalten.* Das haben vor Kurzem Ben Green von der Universität von British Columbia in Vancouver (Kanada) und Terence Tao von der Universität von Kalifornien in Los Angeles bewiesen.

Ein genauerer Blick zeigt: Es ist nur ein Hauch von Regelmäßigkeit im Ozean des Regellosen. Während es für zusammengesetzte Zahlen unzählige Kämme gibt, ist ein einigermaßen langer Primzahlkamm nur mit äußerster Mühe



BEIDE ABBILDUNGEN: CHRISTOPH PÖPPE

ausfindig zu machen. Der Beweis von Green und Tao erklärt einem auch nicht, wie man einen solchen Kamm findet; er sagt allenfalls, an welchen Stellen es nicht zu suchen lohnt.

Der Anschein der Regellosigkeit

Es ist sehr unübersichtlich unter den großen natürlichen Zahlen. Fühlen Sie sich weit nach draußen auf der Zahlengerade versetzt, irgendwo in die Zwanzigstelligen, wo Sie keine einzige Zahl mehr persönlich kennen – selbst Ihre 16-stellige Kreditkartennummer haben Sie schon weit hinter sich gelassen. Welche unter den Zahlen in Ihrer Umgebung sind Primzahlen? Man könnte es herausfinden, mit dem Sieb des Eratosthenes oder auch mit Primzahltests, die auf solche Fragen weit schneller eine Antwort geben. Aber ein Muster ist nicht erkennbar.

Weit draußen werden die Primzahlen auch immer seltener. In der Nähe der großen Zahl N ist die Chance auf einen Treffer ungefähr $1/\log N$, wobei log den natürlichen Logarithmus bezeichnet.

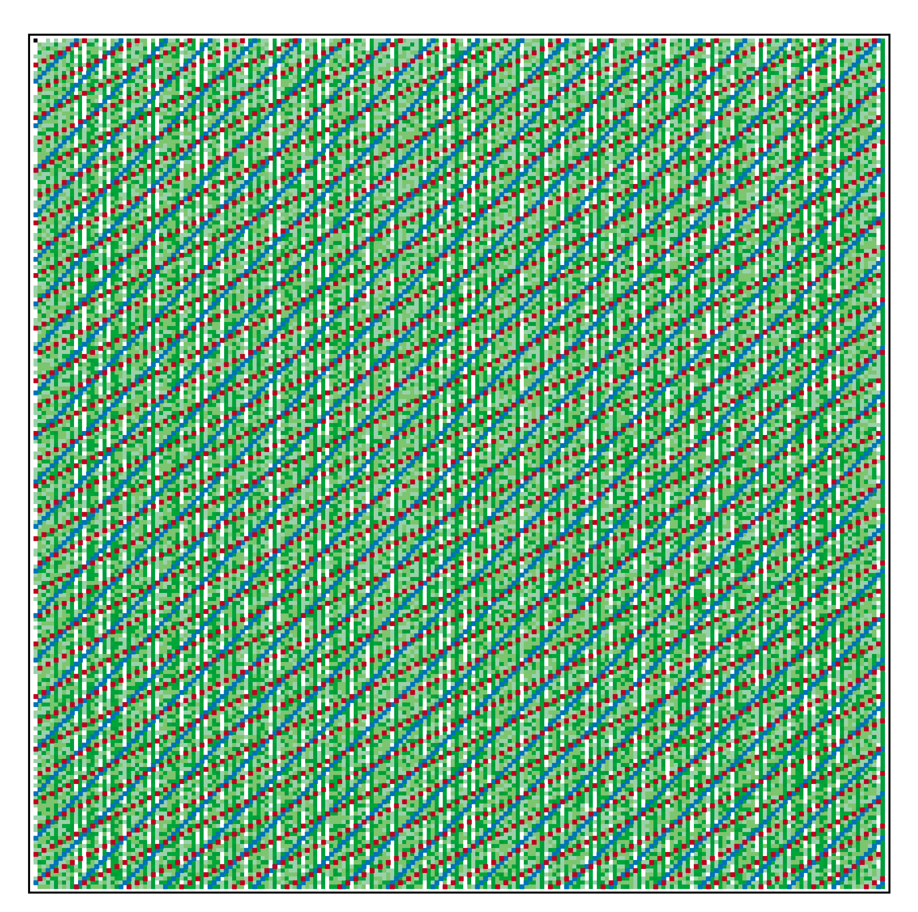
Stellen Sie sich vor, ein Kobold macht bei jeder Zahl ein Zufallsexperiment (einen »Münzwurf«), das mit einer Wahrscheinlichkeit von $1/\log N$ die Antwort »ja« liefert, und malt alle Zahlen, bei denen »ja« herauskommt, weiß an. (Die anderen sind irgendwie farbig.) Alle Münzwürfe sind unabhängig voneinander. Dann sieht es hinterher so aus, wie wenn jemand genau die Primzahlen weiß angemalt hätte.

Das ist das Vertrackte an den Primzahlen: Wenn man sie sich einfach so anschaut, ohne von dem Wissen, dass es Primzahlen sind, Gebrauch zu machen, dann gibt es kein statistisches Mittel, ihre Verteilung von einer schlicht ausgewürfelten zu unterscheiden. Aber sie ist eben nicht ausgewürfelt. Man kann sich auf nichts verlassen, nicht einmal auf die Regellosigkeit. Und das macht paradoxerweise die Sache erst richtig schwierig.

Wenn nämlich die Primzahlen wirklich unabhängig voneinander ausgewürfelt wären, dann wären Kämme aus statistischen Gründen praktisch unvermeidlich. Die Chance von $1/\log N$, an der Stelle N eine Primzahl anzutreffen, ist für $N = 10^{20}$ knapp 1/46. Ungefähr zwei von hundert Zahlen in dieser Gegend sind Primzahlen – etwas mager verglichen mit den 23 Primzahlen unter den ersten hundert, aber nicht verschwindend wenig. Die Wahrscheinlichkeit, rein durch Zufall einen Kamm mit, sagen wir, zehn Zinken zu finden, ist die zehnte Potenz dieser Zwei-Prozent-Chance oder ungefähr $2 \cdot 10^{-17}$, was hoffnungslos wenig erscheint. Aber wir haben 10^{20} Plätze zur Verfügung, um in dieser Gegend unseren Kamm anzusetzen, und den Zinkenabstand können wir auch noch variieren. Da müssten doch rein per Zufall reichlich arithmetische Folgen zu Stande kommen.

Dieses Argument ist zwar falsch (siehe unten), aber die Idee ist gleichwohl fruchtbar. Man kann sie handfester machen, indem man sich die Zahlenreihe von einem physikalischen Standpunkt aus anschaut. Tun wir so, als wäre die Zahlengerade die Zeitachse, und die Zahlen rauschten im Megahertztempo an uns vorbei, eine Million pro Sekunde, ein Tempo, bei dem ein moderner PC noch ganz gut mithalten kann. Nach einer guten Viertelstunde ist die erste Milliarde vergangen, sodass es uns nicht allzu langweilig wird, bis wir zu den großen Zahlen kommen. Jedes Mal, wenn eine Primzahl kommt, gibt es einen kurzen elektrischen Stromstoß, der sich als Knacken in unserem Lautsprecher bemerkbar macht. Unser gedachter Primzahlzähler klingt dann wie ein Geiger- ▷

◄ **Die natürlichen Zahlen von 1 bis 900 in Zeilen der Länge 30 aufgetragen: Die Eins ist schwarz, alle Primzahlen sind weiß, die Vielfachen von 2 sind gelb, die von 3 pink, die von 5 grün gefärbt und so weiter; die Farben mischen sich. Primzahlen können, von der ersten Zeile abgesehen, nur in gewissen Spalten der Tabelle liegen. Mehrere weiße Felder untereinander entsprechen einer arithmetischen Primzahlfolge mit der Schrittweite (dem »Zinkenabstand«) 30. Die Vielfachen von 7 (Sternchen) verhindern, dass mehr als sechs weiße Felder aneinander grenzen. Durch schwarze Rähmchen hervorgehoben sind die Vielfachen von 29 (blau) und 31 (rot).**



▲ **Die natürlichen Zahlen von 1 bis $210^2 = 44\,100$ von oben nach unten in Zeilen der Länge 210 aufgetragen: Primzahlen sind weiß; die Farbe der anderen Felder entspricht der Anzahl an Primteilern der entsprechenden Zahl. Hervorgehoben sind die Vielfachen von 11 (rot) und 13 (blau), welche die weißen Strecken in ihrer Länge begrenzen. In der rechten oberen Ecke erkennt man die zehnteilige arithmetische Primzahlfolge {199, 409, 619, ..., 2089}, die für die Schrittweite 210 bereits die maximal mögliche Länge hat.**

▷ zähler: Die Primzahlen kommen genauso regellos wie radioaktive Atomzerfälle. Einigermaßen vorhersagbar ist allenfalls die durchschnittliche Zerfallsrate oder eben Primzahldichte.

In dieser regellosen Folge von Knacksignalen suchen wir nach periodisch wiederkehrenden Ereignissen mit zunächst unbekannter Periode – nichts anderes sind arithmetische Folgen von Primzahlen. Und für die Suche nach Periodischem gibt es ein probates Mittel: die Fourier-Analyse.

Primzahlen mit Energie

Mit ihr zerlegt man zum Beispiel ein akustisches Signal, das eine gewisse Grundperiode hat, in Grund- und Oberschwingungen. Unsere natürlichen Zahlen haben keine Grundperiode? Das ist nicht schlimm. Oberhalb einer gewissen sehr großen Zahl N geben wir die Suche auf und zählen wieder von vorn, immer wieder, dann ist das Signal periodisch. Dadurch verpassen wir die Kämme, die über die Zahl N hinausragen, und finden vielleicht ein paar falsche, die den Übergang von N nach 1 überspannen. Aber das sind lösbare Nebenprobleme. Dass unsere gedachte Zeit nicht kontinuierlich ist, sondern aus lauter diskreten Zahlen besteht, macht auch nichts. Darauf lässt sich der Formalismus der Fourier-Analyse ohne Weiteres anpassen.

Das Schöne an der Fourier-Analyse ist: Sie findet immer irgendetwas. Es kommt nicht darauf an, ob der Datenreihe wirklich ein physikalischer Schwingungsprozess zu Grunde liegt. Ob wir den Schall aus einer Orgelpfeife oder die Folge der Primzahlen analysieren, am Ende der Rechnung kommt immer heraus, aus welchen periodischen Ereignissen man sich das Eingangssignal zusammengesetzt denken könnte. Mehr noch: Die Analyse schreibt jeder der Schwingungen, die sie ausrechnet, eine Energie zu, und die Summe dieser Energien ist gleich der Energie des Eingangssignals. (Mathematiker bevorzugen die Bezeichnung »L^2-Norm« statt Energie.)

Da die Primzahlen nicht von Natur aus irgendwelche physikalischen Eigenschaften haben, sind wir frei, sie ihnen geeignet zuzuschreiben. Green und Tao geben jeder Primzahl p die Energie $\log p$. Auf diese Weise herrscht überall auf der Zahlengerade die gleiche Energiedichte. Weit draußen sind die Primzahlen zwar seltener, aber dafür entsprechend fetter.

Die gesamte Energie des Intervalls von 1 bis N muss sich jetzt in den Fourier-Schwingungen wiederfinden. Die energiereichste Schwingung muss mehr als die – berechenbare – Durchschnittsenergie aller Schwingungen haben. Also hat sie eine gewisse Mindestenergie, und das heißt auch: eine gewisse Mindestanzahl an beteiligten Primzahlen. Und das ist schon fast eine arithmetische Folge von Primzahlen – auch wenn es keinen Hinweis darauf gibt, wo wir sie zu suchen haben.

Leider reicht dieses Argument allein noch nicht aus. Die im Prinzip denkbaren Schwingungen sind so viele, dass die Durchschnittsenergie pro Schwingung zu niedrig ist, um weiter gehende Schlüsse zu erlauben. Wäre das Eingangssignal wirklich vollkommen regellos, dann wüsste man, dass es »ergodisch« ist, das heißt, seine Energie auf alle möglichen Schwingungen ziemlich gleichmäßig verteilt. Aber ausgerechnet der Mangel an Regellosigkeit ist, wie oben angedeutet, dazu angetan, arithmetische Folgen von Primzahlen zu verderben. Warum?

Nehmen wir einen zweizinkigen Kamm – das ist eine aufgeblasene Ausdrucksweise für zwei Primzahlen in beliebigem Abstand – und versuchen, eine dritte Zinke im gleichen Abstand zu finden. Wenn der Zinkenabstand nicht durch 3 teilbar ist, dann haben wir nicht eine geringe, sondern gar keine Chance.

Den Grund dafür sieht man am besten mit dem beliebten Moduloskop. Wenn man dieses fiktive Gerät (Spektrum der Wissenschaft 12/1990, S. 12) auf eine natürliche Zahl richtet, zeigt es einem statt der Zahl selbst den Rest, der bei der Division durch – zum Beispiel – 3 übrig bleibt. Die Zahl, durch die dividiert wird, ist mit einem kleinen Stellrädchen einstellbar. Schauen wir unsere Primzahlen mit dem auf 3 eingestellten Moduloskop an. Wenn wir bei der ersten Primzahl p_1 eine Eins sehen und bei der zweiten p_2 eine Zwei, dann sehen wir bei der Zahl k, die den Zinkenabstand angibt, eine Eins. Denn eine Gleichung wie $p_1+k=p_2$ bleibt bei Betrachtung unter dem Moduloskop eine Gleichung, und die muss in diesem Fall 1+1=2 sein.

Die dritte Zinke wäre in unserem Beispiel p_2+k. Das ist unter dem Moduloskop gleich 2+1=3 oder, was dasselbe ist, gleich 0, das heißt, p_2+k ist durch 3 teilbar und daher mit Sicherheit keine Primzahl. Von den drei Zinken eines solchen Kamms könnte allenfalls die erste gleich 3 sein, denn die einzige durch 3 teilbare Primzahl ist die Drei selbst. Das ergibt die Kämme {3, 5, 7}, {3, 7, 11}, {3, 11, 19} und so weiter.

Allgemein gilt: Wenn wir einen Kamm mit m Zinken suchen, dann muss der Zinkenabstand k durch alle Primzahlen teilbar sein, die kleiner sind als m. Denn wenn das nicht der Fall ist, wenn also k nicht durch eine Primzahl q teilbar ist, dann zeigt das Moduloskop mit Einstellung q von Zinke zu Zinke jeweils eine andere Zahl, und spätestens nach q Zinken kommt die Null, sodass die entsprechende Zahl durch q teilbar ist.

Wenn man also einen zehnzinkigen Kamm sucht, muss der Zinkenabstand ein Vielfaches von $2\cdot3\cdot5\cdot7=210$ sein, und für zwanzig Zinken muss man sich auf einen Abstand von $2\cdot3\cdot5\cdot7\cdot11\cdot13\cdot17\cdot19=9\,699\,690$ oder ein Vielfaches davon einstellen. Bei diesen großen Abständen ist Kopfrechnen aussichtslos.

Einen gewissen Eindruck gewinnt man, wenn man die Zahlen in Zeilen der Länge – zum Beispiel – 30 oder 210 untereinander anordnet (Grafiken S. 114/115). Nur in gewissen Spalten der Tabelle kommen Primzahlen überhaupt vor. Außerdem kann man sich bei der Suche nach arithmetischen Primzahlfolgen auf jeweils eine solche Spalte beschränken.

Ein bisschen regelhaft, ein bisschen regellos

So kamen Green und Tao, unter Verwendung zahlreicher Resultate anderer Forscher, schließlich zum Ziel: Primzahlen sind irgendwie einerseits ein bisschen regelhaft und andererseits ein bisschen regellos. Aber es gelingt, zwischen ihrer regelhaften und ihrer regellosen Seite eine gewisse Trennung zu ziehen, und zwar mit Hilfe einer geeignet erweiterten Fourier-Analyse. Die Regelhaftigkeit spielt sich nämlich im Wesentlichen bei den kleinen Primteilern ab, das heißt für die Fourier-Analyse: bei den hohen Frequenzen. Bei den tiefen Frequenzen – entsprechend großen Abständen – dagegen geht es wild zu, und entsprechend steigt die Chance auf einen Zufallstreffer. Also konstruierten Green und Tao das, was ein Akustikingenieur einen Tiefpass- und einen Hochpassfilter nennen würde. Deren Trennschärfe lässt zwar zu wünschen übrig, ist aber ausreichend, um zu zeigen, dass genügend Energie bei den tiefen Frequenzen angesiedelt ist.

Um genau zu sein: Es gelingt nicht, die verfügbare Energie quantitativ hinreichend genau abzuschätzen. Man kann nur zeigen, dass sie beliebig anwächst, wenn man den zu Grunde liegenden Zahlenbereich von 1 bis N beliebig groß wählt. Das Anwachsen ist zwar quälend langsam, proportional zu $\log N$ oder noch schleichender, aber das ist kein Grund zur Besorgnis: Es gibt ja unendlich viele natürliche Zahlen.

Daraus folgt: Zu jeder vorgegebenen Länge m gibt es irgendwo ganz weit draußen eine arithmetische Primzahlfolge der Länge m. Mehr als eine? Vielleicht sogar unendlich viele? Das ist plausibel, aber nicht bewiesen. Eine solche Folge zu finden ist, wie gesagt, ein ganz anderes Problem. Green und Tao geben immerhin zwei – von anderen gefundene – Kämme der Länge 21 an: Man fange bei 11 410 337 850 553 an und gehe in Schritten von 4 609 098 694 200 oder ab 376 859 931 192 959 in Schritten von 18 549 279 769 020.

Der gegenwärtige Rekord ist eine arithmetische Primzahlfolge der Länge 23 mit Startzahl 56 211 383 760 397 und Schrittweite 44 546 738 095 860. Wie es sich gehört, haben alle drei Schrittweiten als Teiler ein vollständiges Sortiment kleiner Primzahlen:

$4\,609\,098\,694\,200 = 2^3 \cdot 3 \cdot 5^2 \cdot 7 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 1033$,

$18\,549\,279\,769\,020 = 2^2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 5939$,

$44\,546\,738\,095\,860 = 2^2 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7^2 \cdot 11 \cdot 13 \cdot 17 \cdot 19 \cdot 23 \cdot 99\,839$.

Markus Frind, Paul Jobling und Paul Underwood fanden die Rekordfolge, indem sie ein geschicktes Suchprogramm auf mehreren Computern zugleich ablaufen ließen. Bei den Rechnern handelte es sich größtenteils um Server der (kostenfreien) Partnersuch-Website www.plentyoffish.com. Das macht Sinn. Es geht darum, durch kombinatorische Bemühungen Singles mit zueinander passenden Eigenschaften zusammenzubringen. Das Problem ist dem Computer einer Datingagentur geläufig. ◁



AUTOR

Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

PREISRÄTSEL

Überholfreude

Von Paul von der Heyde

Für Alf, Bea, Carl und Dora besteht der Spaß beim Joggen im Überholen. Eine einfache Regel sorgt für eine gerechte Verteilung des Vergnügens: Bei einem Lauf überholt jeder der vier genau einmal einen, einmal zwei und einmal alle drei Vorauslaufenden. Im Übrigen laufen sie in einer Reihe, und es schert stets nur einer zum Überholen aus.

Heute starten sie in der Reihenfolge A B C D: Dora voraus, gefolgt von Carl, Bea und Alf, und stellen im Ziel fest, dass jeder eine ungerade Anzahl von Malen überholt wurde. In welcher Reihenfolge kamen sie ins Ziel?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

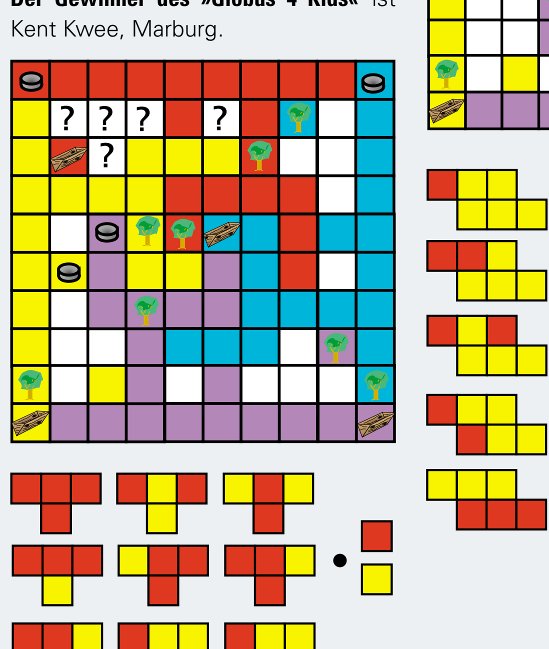
Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir drei batterielose Taschenlampen »Everlight XXL«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 12. April 2005, eingehen.

Lösung zu »Jans zerstrittene Herde« (Februar 2005)

Die Weideflächen der vier Kühe gehen durch Drehung um 90 Grad auseinander hervor. Gerhard Guthöhrlein aus Marburg fand zwei Grundformen (unten und rechts) mit Varianten: Die Felder mit Fragezeichen sind durch jeweils einen der Bausteine darunter zu ersetzen und die weißen Felder symmetrisch zu füllen. Das ergibt $2 \cdot 9 + 3 \cdot 16 = 66$ Lösungen.

Der Gewinner des »Globus 4 Kids« ist Kent Kwee, Marburg.

Eine Online-Lösungshilfe finden Sie unter www.stephan-eisenbart.gmxhome.de/jans_herde/index0.html.



Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

RELIGIONSARCHÄOLOGIE

Spuren des Glaubens

Die Olmeken, Mittelamerikas älteste Hochkultur, kannten nach vorherrschender Meinung keine Priester, sondern Schamanen. Doch neue Indizien weisen in eine andere Richtung.

Von René Dehnhardt

Der Glaube an Geister oder Götter ist vermutlich seit frühester Zeit ein zentraler Bestandteil der menschlichen Natur, die Religionen vergangener Völker faszinieren dementsprechend Fachleute wie Laien. Kunstvolle Götterbilder holen Besucher in die Museen, Fotos von Ritualobjekten verleihen archäologischen Berichten den letzten Schliff. Doch wie gesichert sind Erkenntnisse über den Glauben längst verschwundener Kulturen? Insbesondere solcher, die im Unterschied etwa zur ägyptischen Hochkultur keine schriftliche Überlieferung entwickelt hatten, Rituale und Götternamen also nicht für die Nachwelt fixieren konnten?

Religion an sich kann nicht ergraben, sondern nur indirekt aus den Hinterlassenschaften der Praktizierenden erschlossen werden. Funde aber lassen sich oft unterschiedlich deuten. Für die Religion der Olmeken konkurrieren deshalb zwei Theorien: Die meisten

Dieser monumentale Kopf stand auf einem zentralen Platz der Olmeken-Stadt La Venta, wahrscheinlich zeigte er ihren Herrscher. Kolossalköpfe sind charakteristisch für diese mittelamerikanische Kultur, keine der späteren hat solche Bildnisse hinterlassen.

Forscher halten diese älteste Hochkultur Mesoamerikas für schamanistisch, doch eine Neubewertung der Daten spricht meines Erachtens dagegen.

Die Olmeken lebten etwa 1200 – 500 v. Chr. im Bereich der heutigen mexikanischen Bundesstaaten Veracruz und Tabasco an der Golfküste. Anders als die jüngere Hochkultur der Maya kannten sie noch keine Schrift, auch wenn die Grundlagen dieser Kulturtechnik damals schon gelegt waren (siehe Spektrum der Wissenschaft 6/2003, S. 14). Und weil ihre Siedlungen – die bekanntesten sind La Venta, San Lorenzo und Tres Zapotes – zur Zeit der spanischen Eroberung längst verfallen waren, existieren auch keine Aufzeichnungen europäischer Zeitgenossen wie bei den Azteken.

Diesen Mangel lösen Religionsarchäologen seit den 1960er Jahren durch das fragwürdige Kredo einer mehr als 3000 Jahre währenden, kaum veränderten Religion in dieser Weltgegend. Die methodische Konsequenz: Anhand von Ähnlichkeiten etwa olmekischer und aztekischer Bildwerke schließen sie aus der besser bekannten jüngeren auf die gänzlich unbekannte ältere Kultur.

Doch würde niemand ernsthaft versuchen, aus dem heutigen Christentum ohne Textquellen die Religion der alten Königreiche Israel und Juda zu erschließen, ja selbst eine Ableitung der frühchristlichen Kirche aus dem Ist-Zustand müsste scheitern. Um wie viel verwegener erscheint also ein solches Vorhaben bei einer Religion, die nicht durch relativ wortgetreue Vermittlung in Heiligen Schriften durch die Jahrhunderte getragen wurde. Zwar kann mündliche Überlieferung Wissen und Mythen über erstaunlich lange Zeiträume weitergeben, doch Modifikationen kommen vor. Von Fahrlässigkeit oder falscher Erinnerung einmal ganz abgesehen, versuchten Erzähler sicherlich, wichtige Geschehnisse in die Erklärungsmuster der mythologischen Überlieferung einzupassen. Ein schönes Beispiel liefert eine heutige Legende der im brasilianischen Tiefland lebenden Aparai-Wayana-Indianer. Demnach entstanden die von ihnen hoch geschätzten Glasperlen einst aus dem Kot zweier mythischer Vögel. Tatsächlich lernten diese Menschen Perlen als Geschenke und Tauschwaren der europäischen Eroberer kennen. Offenbar genügen also wenige hundert Jahre, um religiöse Überlieferungen zu verändern. Entsprechend ist die Übertragung über archäologisch relevante Zeiträume hinweg und von einer vergangenen Kultur auf eine andere sehr skeptisch zu betrachten.

Als genügten diese Schwierigkeiten noch nicht, muss der Religionsarchäologe in Sachen präkolumbischer Kulturen noch größere Vorsicht walten lassen. Was immer noch erhaltene Schriftzeugnisse etwa der Maya oder Azteken verraten, vergleicht er für gewöhnlich mit Aufzeichnungen christlicher Missionare oder missionierter Indianer.

Mutterkultur ohne Nachfahren

Die Identifikation von Göttern und Mythen erfolgt allein auf diesem Weg. Doch für jene Christen waren die »heidnischen« Götter und Rituale verwerflich, ja böse, wie die Gleichsetzung des aztekischen Hauptgottes Huitzilopochtli mit Satan höchstpersönlich eindringlich zeigt. Wie viel Verständnis durfte da ein Schamane erwarten, der von sich behauptete, nachts als Jaguar umherzustreifen? Hätte man ihm Glauben geschenkt, wäre er als Werwolf oder Hexer verfolgt und getötet worden.

Demnach ist schon die Rekonstruktion der Götterwelt der klassischen Maya und der Azteken alles andere als trivial, wenn auch direkte Nachfahren dieser Kulturen manches erleichtern. Für die Olmeken aber gibt es auch diese Hilfe nicht. Obwohl sie als Mutterkultur Mesoamerikas gelten, stammt doch keine der späteren Hochkulturen direkt von ihnen ab. Häufig werden deshalb Ethnien zum Vergleich herangezogen, deren Sprache sich aus dem Olmekischen entwickelt haben soll. Selbst wenn das zutrifft: Ob sich deren heutige Vorstellungen 2500 Jahre zurückprojizieren lassen, scheint mir fraglich. ▷

Die Olmeken bauten in Mittelamerika als Erste Städte mit Palästen und Tempeln. Ihre Kultur ist in vieler Hinsicht noch rätselhaft.



GLOSSAR

▶ **Geister und Götter** repräsentieren zwei Klassen von übernatürlichen Wesen. Eine Unterscheidung liegt darin, dass Geister Gesetzen unterliegen, sodass Menschen sie bezwingen können. Götter dagegen sind völlig frei in ihrem Handeln, der Mensch kann sich ihnen nur bittend zuwenden.

▶ **Schamanen** sind religiöse Vermittler, deren Hauptmerkmal nach Mircea Eliade in der Meisterung ekstatischer Zustände liegt. In Trance stellen sie die Verbindung zu einer Geisterwelt her, von der sie auch zu ihrer Tätigkeit als Jagd- und Wetterzauberer, Seher, Seelenbegleiter und Heilkundiger berufen werden.

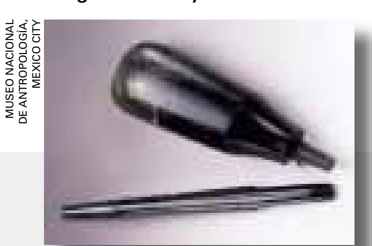
▶ **Priester** vermitteln zwischen Menschen und Göttern. Nach einer Ausbildung vollziehen sie ihre Tätigkeit durch Ritual und Gottesdienst.

▶ **Heiler** decken nur den medizinischen Bereich ab, in der Regel auch ohne ekstatische Zustände. Ihre religiöse Bedeutung ist gering.

Vermutlich existieren durchaus Ähnlichkeiten in den Glaubensinhalten und Ritualen der verschiedenen antiken Völker Mesoamerikas, daran habe ich keinen Zweifel. Doch man kann diese angenommene Ähnlichkeit nicht an den Anfang einer Rekonstruktion von Religion stellen. Vielmehr müssen wir versuchen, die Hinterlassenschaften der Olmeken für sich sprechen zu lassen. Liefern sie zum Beispiel Belege für die gängige These, ihre Kultur sei schamanistisch gewesen? Diese Idee geht auf eine 1968 veröffentlichte Arbeit zurück und wird seit den 1990er Jahren von den klassischen Maya auf die Olmeken übertragen. Neuerdings ist in populärer Literatur sogar von Schamanenpriestern die Rede. Aber was genau bedeuten diese Begriffe? Den Geisteswissenschaften sagt man gern einen freien bis beliebigen Umgang mit Definitionen nach, und tatsächlich fehlen hier genaue Eingrenzungen. Allerdings: Auch in anderen Bereichen der Archäologie besteht kaum ein Konsens über die konkreten Inhalte religiöser Begriffe.

Was also sollte man unter einem Schamanen verstehen? Mircea Eliade, Pionier auf diesem Forschungsgebiet, stellte die Meisterung ekstatischer Zustände in den Mittelpunkt seiner Definition (siehe Glossar). Dieses psychische Phänomen ließe sich archäologisch allenfalls indirekt nachweisen, doch herrscht auch hier keine Einigkeit darüber, wie dies geschehen sollte.

▼ **Grab A aus La Venta ist eine der ungewöhnlichsten Konstruktionen in Mesoamerika. Basaltsäulen bildeten eine hüttenartige Einfassung. Im Inneren fanden die Archäologen neben Jadebeigaben die Knochenreste zweier Kinder. Eines der Objekte, eine Jadenachbildung eines Rochenstachels, soll für Blutopferzeremonien verwendet worden sein, wie man sie später auf Darstellungen der Maya findet.**



MUSEO NACIONAL DE ANTROPOLOGÍA, MEXICO CITY

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Kreuz und Weltenbaum

Zwar weiß man von jüngeren Kulturen, dass sie »Medizinmänner« meist anders bestatteten, doch löst das unser Problem? Nein, denn man mag zwar von einem Grab sagen können, dass es sich stark von anderen unterscheidet, doch wie sollte ein Archäologe die Beisetzung eines Priesters oder Heilers (siehe Glossar) von der eines Schamanen unterscheiden, ohne Kenntnis der jeweiligen religiösen Vorstellungen? Ein Zirkelschluss.

Einen Ausweg verheißen Vorstellungen und Weltbilder, die fest mit dem Schamanismus verbunden sind, wie die immer wieder anzutreffende Kosmologie: Über der diesseitigen Welt der Menschen liegt demnach eine strukturierte Himmelswelt, darunter die Unterwelt; ein Weltenbaum verbindet die drei Ebenen. Diese Idee schlägt sich auch in Darstellungen nieder, wobei der Baum auch als Berg oder gar abstrakt, etwa als Kreuz, symbolisiert werden kann. Dergleichen finden Religionsarchäologen durchaus in olmekischen Siedlungen: kreuzförmig niedergelegte Opferungen und Kreuzgravuren auf rituellen Objekten. Doch handelt es sich bei diesen Merkmalen keineswegs um hinreichende, sondern lediglich um notwendige Kriterien. Das zeigt ein Umkehrschluss: Auf Grund des Kreuzsymbols und der geschichteten Weltvorstellung von Himmel, Erde und Hölle allein müsste ein Archäologe auch das Christentum als schamanistische Religion deuten. Auch bei den Azteken müssten wir diese Folgerung ziehen, doch nicht zuletzt aus den Berichten der Spanier wissen wir um deren Priester und Götter.

Doch nun eine gute Nachricht: Religionsformen korrelieren häufig mit anderen kulturellen Faktoren. Zum Beispiel erkannte der Anthropologe Michael J. Winkelman von der Universität des amerikanischen Bundesstaats Arizona in Tempe durch einen statistischen Kulturvergleich, dass Schamanismus signifikant mit einer nichtagrarischen Lebensweise und einer geringen politischen Komplexität der Gemeinschaft einhergeht. Das klassische Beispiel sind reine Jäger-Sammler-Gruppen. Im Gegensatz dazu dominiert bei agrarischen Gesellschaften mit ausgeprägter Hierarchie eine Religion mit einem Priester an der Spitze.

An dieser Stelle kommen Funde ins Spiel, die dem alltäglichen Leben der Olmeken zuzu-

ordnen sind: Maispollen und Pflanzenreste etwa von Bohnen. Sie wurden in der unmittelbaren Umgebung von La Venta entdeckt und 2001 in einer Publikation beschrieben. Offenbar leistete Landwirtschaft zumindest in dieser bedeutenden Metropole einen wichtigen Beitrag zur Ernährung. Tatsächlich spricht schon die bloße Existenz von Städten gegen eine schamanistische Glaubenswelt, impliziert ihre Errichtung sowie das stets eindeutige Machtzentrum doch ein komplexes sozialpolitisches System. Demnach verehrten die Olmeken also Götter unter der Anleitung von Priestern.

Nach all den Einschränkungen und Bedenken ist das ein erstaunlich eindeutiges Ergebnis. Doch natürlich hat es einen Haken: Eine absolut verlässliche Aussage kann eine Statistik nicht leisten – die Olmeken könnten ganz einfach die Ausnahme von der Regel sein. Ohnehin ist die Datenbasis in der Religionsarchäologie sehr klein, denn die Zahl der untersuchten Kulturen ist begrenzt. Weitere, unabhängig vom statistischen Vergleich erbrachte Indizien wären wünschenswert. Das mag übervorsichtig erscheinen, hat aber gute Gründe: Die olmekische Hochkultur muss sich direkt aus weniger komplexen Vorgängern entwickelt haben, denn eine noch ältere wurde für Mesoamerika bislang nicht nachgewiesen. Dieses Volk stand also der Jäger-Sammler-Tradition noch sehr viel näher als etwa die um einiges jüngere Kultur der Azteken, die auf einer fast 2000-jährigen Entwicklung aufbauen konnte.

Für weitere Belege wenden wir uns deshalb wieder der Archäologie zu. Gräber geben Hinweise auf Jenseitsvorstellungen. In La Venta wurde bereits 1942 das so genannte Grab A entdeckt (siehe Bild links). Darin fanden die Archäologen neben Jadeobjekten auch Knochenreste von Kindern. Weil die Fundstätte in einem als zeremoniellen Bezirk verstandenen Stadtteil liegt, muss man von einer Opferniederlegung ausgehen.

Wodurch unterscheiden sich Paläste von Tempeln?

Kritisch gefragt: Woher wissen Forscher, dass jener Bereich La Ventas der Religion gewidmet war? Die klassische Begründung: eine strenge Symmetrie und die Lage direkt nördlich der großen Pyramide. Doch wieder erweisen sich diese Kriterien lediglich als hinreichend, nicht als notwendig. Denn nicht jede symmetrische Baustruktur ist automatisch religiös, wie die Architekturgeschichte lehrt. Ohne zusätzliches Wissen etwa aus den Hieroglyphen wäre das nicht einmal für die ägyptischen Pyramiden in Gizeh eindeutig zu sagen.

Natürlich »weiß« jeder, dass die Pyramiden, ob in Ägypten oder in Mittelamerika, religiös motiviert waren, aber wie lässt sich das am Bauwerk selbst begründen? Wodurch unterscheiden sich Paläste von Tempeln? Bis heute gibt es dafür keine allgemeinen Kriterien, und ein Blick auf die Formenvielfalt von Kirchen, Moscheen und Gebetshäusern verdeutlicht das Problem. So fehlen auch bei La Venta streng genommen Beweise für den religiösen Bezirk, doch in ihrer Gesamtheit sprechen die Indizien eine deutliche Sprache: strenge Symmetrien, ein immens aufwändiges Bauwerk (die Pyramide), Opferniederlegungen von gewaltigem Ausmaß, grabähnliche Opferungen ohne Bestattungen und dann eben jenes Grab A. In diesem Gesamtkontext ist die Deutung als Menschenopfer wahrscheinlicher als die Interpretation als Kindergrab.

Doch das Opfern von Menschen alleine reicht leider nicht aus, um zwischen Götterglauben und Schamanismus zu unterscheiden, von Bedeutung ist der Adressat. Darauf gibt eine erst vor wenigen Jahren vollständig ausgegrabene Gruppe von Monumenten dieser Ausgrabungsstätte einen Hinweis. Sie präsentieren ein Wesen, dessen menschliche Züge mit stilisierten Elementen von Tieren, Pflanzen und eventuell Naturkräften kombiniert wurden. Auch wenn hier wieder Auseinandersetzungen um Definitionen lauern – die Bildnisse zeigen wohl einen Gott beziehungsweise eine Gruppe von Göttern.

In der Religionsarchäologie führen oft nur Umwege über schmale Pfade mit zahlreichen Hindernissen zum Ziel. Immerhin sind wir zu einer überraschenden Einsicht gelangt: Zumindest die Olmeken von La Venta verehrten Götter und das impliziert die Anleitung durch Priester. Streng genommen wissen wir noch nicht, ob sich dieser Befund auch auf andere olmekische Städte und auf die Landbevölkerung übertragen lässt. Und vermutlich werden wir niemals erfahren, wie diese Menschen das schreckliche Wesen nannten, dem sie die Gebeine von Kindern zum Opfer darbrachten. ◁

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Was sollten die sechs Wesen, die jene Figur im Zentrum umfliegen, anderes sein als Götter? Lange galt diese so genannte Stele 2 aus La Venta als Beleg eines Götterglaubens, vermutlich signalisierte die Darstellung aber eher eine räumliche Perspektive – es handelte sich um das Gefolge eines Herrschers.

AUTOR



Der Altamerikanist **René Dehnhardt** promoviert am Institut für Altamerikanistik und Ethnologie der Universität Bonn über die Religion der Olmeken.

Das Tal der tausend Buddhas

Wer sich von China aus anschickte, auf der Seidenstraße sein Glück zu versuchen, hatte in der Flussoase Mogao Gelegenheit, Buddha in tausend kunstvoll ausgeschmückten Grotten um seinen Beistand zu bitten

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

WEITERE THEMEN IM MAI

Rasse und DNA

Die meisten Genmuster variieren nur statistisch zwischen den Populationen. Das möchten Mediziner für individuell angepasste Behandlungen nutzen


J. M. THIRIET

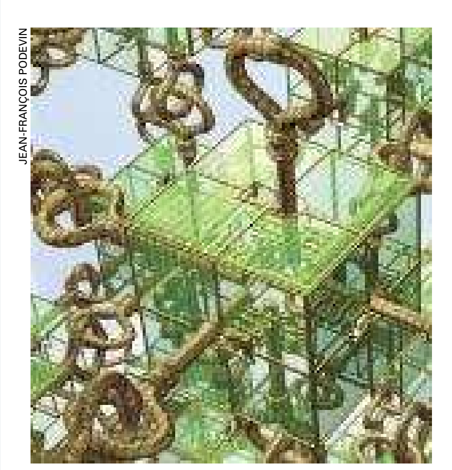
Unterschwellige Wahrnehmung

Unser Gehirn lässt unwissentlich wahrgenommene Bilder zwar nicht bewusst werden, verarbeitet sie aber. Wie macht es das?


PETER CHALLIS, HARVARD-SMITHSONIAN CENTER FOR ASTROPHYSICS / STSCI / NASA

Immer Ärger mit dem Urknall

Was meinen Forscher eigentlich, wenn sie von der Expansion des Kosmos sprechen? Was genau bedeutet der Begriff Urknall? Viele Konzepte der modernen Kosmologie werden häufig missverstanden – manchmal sogar von Astrophysikern


JEAN-FRANÇOIS PODEVIN

Quantenkryptografie

Exotische Phänomene der Mikrophysik ermöglichen, Daten völlig abhörsicher zu verschlüsseln. Solche Quantencodes, bis vor Kurzem noch graue Theorie, kommen nun schon als Produkte auf den Markt